

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría en Ingeniería Electrónica

**Diseño, construcción y evaluación de un arreglo de antenas inteligentes
para la comunicación entre un dron y una estación terrena fija
en la banda de 3,5 GHz**

**Luis Felipe Riaño Galeano
Código: 2155515**



Bogotá D.C., mayo de 2023

**Diseño, construcción y evaluación de un arreglo de antenas inteligentes
para la comunicación entre un dron y una estación terrena fija
en la banda de 3,5 GHz**

**Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería
Electrónica con énfasis en Telecomunicaciones – Modalidad de
profundización**

**Luis Felipe Riaño Galeano
Código: 2155515**

**Directores del trabajo de grado
Ing. Hernán Paz Penagos, PhD.
Ing. Germán Darío Castellanos Tache, MPhil.**

Jurado 1: _____

Jurado 2: _____

Jurado 3: _____

Bogotá D.C., mayo de 2023

Aceptación del jurado

El trabajo de grado titulado “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN ARREGLO DE ANTENAS INTELIGENTES PARA LA COMUNICACIÓN ENTRE UN DRON Y UNA ESTACIÓN TERRENA FIJA EN LA BANDA DE 3,5 GHZ”, presentado por Luis Felipe Riaño Galeano, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Electrónica con énfasis en telecomunicaciones.

Jurado 1

Jurado 2

Jurado 3

Bogotá D.C., mayo de 2023

AGRADECIMIENTOS

A Dios, mis padres, familia y amigos, quienes me apoyaron en todo momento para sacar adelante este proyecto a pesar de las dificultades presentadas durante momentos que pusieron a prueba tantas cosas. Agradecimiento especial a los Ingenieros Hernán Paz Penagos y Germán Darío Castellanos Tache, cuya orientación, asesoría y paciencia permitieron la construcción de este proyecto desde sus inicios, aportando sus amplios conocimientos en el área de las antenas y las telecomunicaciones.

RESUMEN

Debido al uso de vehículos aéreos no tripulados, también conocidos como drones, en diferentes campos de la vida diaria, entre ellos la agricultura, dada su facilidad de manejo y ventajas que representa, se hace necesario asegurar el enlace de comunicación entre el dron con los sensores que lleve equipados y su respectiva estación terrena que recibe los datos. El presente trabajo de grado propone el diseño, elaboración y evaluación de un arreglo de antenas inteligentes para su uso en drones, de manera que comunique este dispositivo y una estación terrena para una frecuencia de 3,5 GHz. Para el cumplimiento de este objetivo se planteó una metodología por etapas en la que se inició con una investigación de las antenas inteligentes en tecnología de microcinta, el estado del arte en el uso de antenas inteligentes en drones, arreglos de antenas inteligentes y las técnicas de detección de señales en arreglos de antenas. Posterior a la etapa de recopilación de esta información, se realizó el diseño del arreglo de antenas inteligentes en tecnología de microcinta y se realizaron las simulaciones correspondientes, obteniendo como resultado que cada elemento del arreglo cuenta con un parámetro S11 de -11 dB a 3,5 GHz, un ancho de banda de 35 MHz, una relación de onda estacionaria (VSWR) de nivel 1,02 y una directividad de 7,6 dB. Teniendo en cuenta las características de cada elemento, se procedió entonces a realizar la construcción de dos arreglos de antenas *microstrip* de 4 y 6 elementos en un sustrato adecuado, corroborando los parámetros encontrados en las simulaciones, con los que se realizaron las pruebas de evaluación de un enlace a 3,5 GHz entre el arreglo de antenas y una estación terrena fija. Los resultados de estas pruebas muestran que el arreglo de 4 elementos no permite establecer una comunicación continua los 360 grados alrededor del dron, pero el arreglo de 6 elementos sí cubre la totalidad de los 360 grados, teniendo en cuenta que las pruebas realizadas se desarrollaron en el ambiente controlado del laboratorio de telecomunicaciones a diferentes distancias. Este último arreglo permite conmutar de manera eficaz el elemento con mayor nivel de señal RSSI (indicador de intensidad de la señal recibida) estableciendo un enlace estación terrena-dron. Se puede concluir que la construcción de arreglos de antenas tipo parche es compatible con su disposición en drones, debido a su bajo peso y directividad, además que, al ser un tipo de antena diseñada para una frecuencia específica, no va a presentar interferencia de otros servicios que puedan afectar la comunicación con el dron.

Palabras clave: antena *microstrip*, arreglo de antenas, antenas inteligentes, estación terrena fija, vehículo aéreo no tripulado.

ABSTRACT

Due to the use of unmanned aerial vehicles, also known as drones, in different fields of daily life, including agriculture, given its ease of handling and the advantages it represents, it is necessary to ensure the communication link between the drone with the sensors that it has equipped and its respective ground station that receives the data. This degree project proposes the design, development and evaluation of an array of smart antennas for use in drones, in order to communicate this device and a ground station for a frequency of 3.5 GHz. To fulfill this objective, we proposed a methodology in stages in which it began with an investigation of microstrip-type smart antennas, the state of the art in the use of smart antennas in drones, smart antenna arrays, and signal detection techniques in antenna arrays. After the stage of gathering this information, the design of the microstrip-type smart antenna array was carried out and the corresponding simulations were carried out, obtaining as a result that each element of the array has an S11 parameter of -11 dB at 3.5 GHz, a bandwidth of 35 MHz, a standing wave ratio (VSWR) of 1.02 level and a directivity of 7.6 dB. Taking into account the characteristics of each element, we then proceeded to build two microstrip antenna arrays of 4 and 6 elements on a suitable substrate, corroborating the parameters found in the simulations, with which the evaluation tests were carried out. a 3.5 GHz link between the antenna array and a fixed ground station. The results of these tests show that the 4-element array does not allow stable communication to be established at 360 degrees around the drone, but the 6-element arrangement does cover the entire 360 degrees, taking into account that the tests carried out were developed in the controlled environment of the telecommunications laboratory at different distances. This last arrangement makes it possible to effectively switch the element with the highest RSSI signal level, establishing a ground station-drone link. It can be concluded that the construction of patch-type antenna arrays is compatible with their arrangement in drones, due to their low weight and directivity, in addition to the fact that, being a type of antenna designed for a specific frequency, it will not present interference from other services that may affect communication with the drone.

Keywords: *microstrip antenna, antenna array, smart antennas, fixed ground station, UAV.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN.....	10
Capítulo 1. Formulación del proyecto	12
1.1. Antecedentes	12
1.2. Justificación.....	23
1.3. Pregunta de investigación.....	24
1.4. Objetivos	25
1.4.1. Objetivo general	25
1.4.2. Objetivos específicos.....	25
Capítulo 2. Marco teórico	27
2. 1. Antenas inteligentes	27
2.1.1. Tipos de antenas inteligentes.....	28
2.1.2. Comparación entre los tipos de antenas inteligentes existentes.	31
2. 2. Arreglos de antenas	32
2.2.1. Tipos de arreglos de antenas.	33
2.2.1.1. Arreglo broadside.	33
2.2.1.2. Arreglo end-fire.....	34
2.2.1.3. Arreglo planar o en el plano	35
2.2.1.4. Arreglo conformado en el espacio.....	36
2.2.2. Antenas tipo parche o <i>microstrip</i>	37
2.2.2.1. Características y diseños de antenas tipo parche.....	38
2.2.2.2. Arreglos de antenas tipo parche.	40
2.2.2.3. Tecnologías usadas para la fabricación de antenas <i>microstrip</i>	43
2. 3. Algoritmos de localización usados en arreglos de antenas.	43
2.3.1. Directividad de los haces.....	43
2.3.1.1. Método de diferencia de tiempo de llegada (TDoA).....	44
2.3.1.2. Método de ángulo de llegada (AoA).	44
2.3.1.3. Método de potencia de llegada (PoA).	45
2.3.1.4. Método de dirección de llegada (DoA).	45
2.3.1.5. Método RSSI (received signal strength indicator).	46

2.3.2. Modelo de propagación en el espacio libre.....	47
Capítulo 3. Metodología.....	49
3.1. Diseño de una antena <i>microstrip</i> rectangular a 3500 MHz.....	51
3.2. Diseño de arreglos de antenas <i>microstrip</i> a 3500 MHz.....	61
Capítulo 4. Pruebas, resultados y discusión de resultados	75
4.1. Evaluación de los parámetros físicos de operación de los elementos de los arreglos.	76
4.2. Resultados.	77
CONCLUSIONES.....	103
TRABAJOS FUTUROS.....	108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
GLOSARIO	114
ANEXOS	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de los tipos de antenas inteligentes. (Widmer, 2017).	31
Tabla 2. Disponibilidad del enlace para el arreglo de 6 elementos, enlace estación terrena-dron	93
Tabla 3. Disponibilidad del enlace para el arreglo de 6 elementos, enlace dron-estación terrena	93
Tabla 4. Ancho de banda del enlace para el arreglo de 6 elementos, enlace estación terrena-dron..	96
Tabla 5. Ancho de banda del enlace para el arreglo de 6 elementos, enlace dron-estación terrena..	96
Tabla 6. Parámetros de transmisión del USRP-2954R. (National Instruments, 2019).	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Casos de usos típicos de drones en comunicaciones inalámbricas (Zeng, 2016).	13
Figura 2. Arquitectura para redes apoyadas por drones. (Castellanos et al. 2019).	14
Figura 3. Esquema de comunicación asistida por drones en zona de desastre. (Shamsoshoara et al., 2021).	16
Figura 4. Modelo simplificado para comunicaciones entre dron-tierra con selección de dron. (Stefanovic et al., 2021).	18
Figura 5. Modelo del sistema de comunicaciones entre un dron y una red de sensores. (Shen et al., 2021).	19
Figura 6. Arquitectura de la red apoyada por drones para uso en aplicaciones de agricultura. (Castellanos et al., 2020).	20
Figura 7. Modelo de propagación aire a tierra. (Vinogradov et al., 2018).	21
Figura 8. Arreglo de 14 elementos para ser ubicado en un dron. (Ibrahim, Deif y Sharawi, 2012).	21
Figura 9. Arreglo de 4 elementos de parche rectangular. (Jackson, 2006).	22
Figura 10. Arreglos de antenas para IoT (Olan Nuñez, 2019).	23
Figura 11. Esquema del funcionamiento de un arreglo de antenas inteligentes. (Guerra, 2013).	27
Figura 12. Sistema de haz conmutado. (Widmer, 2017).	28
Figura 13. Sistema de haz de seguimiento. (Widmer, 2017).	29
Figura 14. Sistema de haz adaptativo. (Widmer, 2017).	30
Figura 15. Patrón de radiación de un arreglo <i>broadside</i> de 10 elementos. (Balanis, 2005).	33
Figura 16. Patrón de radiación de un arreglo <i>end-fire</i> de 10 elementos. (Balanis, 2005).	34
Figura 17. Antena tipo parche, componentes y sistema de coordenadas. (Balanis, 2005).	38
Figura 18. Formas representativas de elementos de antenas <i>microstrip</i> . (Balanis, 2005).	39
Figura 19. Tipos de alimentación comunes para antenas <i>microstrip</i> . (Balanis, 2005).	40
Figura 20. Disposiciones de alimentación para arreglos de antenas <i>microstrip</i> . (Balanis, 2005).	41
Figura 21. Acoplamiento de parches de 100 Ω a una línea de 50 Ω . (Balanis, 2005).	41
Figura 22. Patrón de radiación típico de un arreglo planar de antenas <i>microstrip</i> . (CST Studio).	42
Figura 23. Metodología del proyecto.	50
Figura 24. Dimensiones y longitudes físicas y efectivas de un parche rectangular en tecnología de microcinta. (Balanis, 2005).	54
Figura 25. Visualización de la antena <i>microstrip</i> en TLY-5 en MATLAB.	58
Figura 26. Patrón de radiación de la antena <i>microstrip</i> en TLY-5.	59
Figura 27. Elevación de la antena <i>microstrip</i> en TLY-5 a 3500 MHz.	59
Figura 28. Impedancia de la antena <i>microstrip</i> en TLY-5.	60
Figura 29. Parámetro de dispersión S11 de la antena <i>microstrip</i> en TLY-5.	60
Figura 30. Relación de onda estacionaria (VSWR) simulada en CST Studio.	61
Figura 31. Diseño del arreglo de 4 elementos para operación en 3500 MHz.	65
Figura 32. Diseño del arreglo de 6 elementos para operación en 3500 MHz.	66
Figura 33. Patrón de radiación para el arreglo de 4 elementos en SystemVue.	67
Figura 34. Patrón de radiación para el arreglo de 6 elementos en SystemVue.	68
Figura 35. Construcción de los arreglos de 4 elementos (izq.) y de 6 elementos (der.) en el sustrato TLY-5.	69

Figura 36. Disposición de distancias y alturas usadas en las pruebas de laboratorio.....	70
Figura 37. Ancho de haz de mitad de potencia (HPBW) para cada elemento del arreglo.	70
Figura 38. Ubicaciones de la estación terrena y los arreglos de 4 elementos (izq.) y 6 elementos (der.)	71
Figura 39. Diagrama de bloques del sistema implementado para las pruebas.	72
Figura 40. Configuración de las pruebas para la medición de RSSI de los arreglos en el laboratorio de telecomunicaciones.....	72
Figura 41. Señal transmitida por la estación terrena fija a 3,5 GHz.....	73
Figura 42. Diagrama del algoritmo implementado para la conmutación de los elementos en el arreglo.	74
Figura 43. Kit Entrenador de Antenas ED-3200 del laboratorio de telecomunicaciones.....	75
Figura 44. Parámetros de dispersión S11 de los elementos del arreglo a 3,5 GHz.	76
Figura 45. VSWR de los elementos del arreglo a 3,5 GHz.....	76
Figura 46. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 4 elementos, enlace estación terrena dron.	77
Figura 47. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 4 elementos, enlace dron-estación terrena.	78
Figura 48. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos (enlace estación terrena-dron).....	79
Figura 49. Posición 4, estación terrena-dron.....	80
Figura 50. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos para la posición 4. (enlace estación terrena-dron).....	80
Figura 51. Posición 5, estación terrena-dron.....	81
Figura 52. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos para la posición 5. (enlace estación terrena-dron).....	81
Figura 53. Posición 6, estación terrena-dron.....	82
Figura 54. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos para la posición 6. (enlace estación terrena-dron).....	82
Figura 55. Posición 7, estación terrena-dron.....	83
Figura 56. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos para la posición 7. (enlace estación terrena-dron).....	83
Figura 57. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos (enlace dron – estación terrena).	84
Figura 58. Posición 4, dron-estación terrena.....	85
Figura 59. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos para la posición 4. (enlace dron – estación terrena).	85
Figura 60. Posición 5, dron-estación terrena.....	86
Figura 61. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos para la posición 5. (enlace dron – estación terrena).	86
Figura 62. Posición 6, dron-estación terrena.....	87
Figura 63. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos para la posición 6. (enlace dron – estación terrena).	87
Figura 64. Posición 7, dron-estación terrena.....	88
Figura 65. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos para la posición 7. (enlace dron – estación terrena).	88

Figura 66. Señal transmitida por la estación terrena en las pruebas de conmutación (Marcador 1).	89
Figura 67. Señal transmitida por el dron en las pruebas de conmutación (Marcador 1)	90
Figura 68. SNR del arreglo de 6 elementos.....	91
Figura 69. Entorno de trabajo de MATLAB de Mathworks.	115
Figura 70. Entorno de trabajo de SystemVue de Keysight Technologies.....	117
Figura 71. Entorno de trabajo de CST Studio Suite de Dassault Systèmes.	118
Figura 72. Interfaz de trabajo de LabVIEW Communications.....	119
Figura 73. Interfaz de trabajo de GNU Radio.	120
Figura 74. USRP-2954R de National Instruments.	121
Figura 75. Panel frontal a) y Panel posterior b) del USRP-2954R (National Instruments, 2019). .	122
Figura 76. HackRF One de Great Scott Gadgets.....	123
Figura 77. Placa Arduino Mega 2560.	124
Figura 78. Disposición de pines en la placa Arduino Mega 2560. (Arduino, 2022).....	125
Figura 79. FieldFox N9918A de Keysight.	126
Figura 80. Analizador N9000B de Keysight.	127

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el uso de drones o vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) se encuentra en aplicaciones militares o de seguridad, entretenimiento, topografía, transporte, fotografía, video y agricultura de precisión. Es en este campo en particular que el uso de drones para el monitoreo de cultivos, englobado en una disciplina conocida como agrónica, se ha convertido en una opción para mejorar el desempeño de la agricultura en términos de eficiencia, productividad e inmediatez; permitiendo observar cambios en parámetros de los cultivos para tomar decisiones que permita mejorar la producción de los alimentos. Para conseguir este fin, los drones que se usen en la agrónica tienen que estar conectados con estaciones terrenas, para poder transmitir los datos que toman los sensores que se encuentran ubicados en el dispositivo, por lo que es fundamental asegurar un enlace de comunicaciones confiable entre el dron y la estación terrena.

En este contexto se desarrolla el proyecto “Diseño, construcción y evaluación de un arreglo de antenas inteligentes para la comunicación entre un dron y una estación terrena fija en la banda de 3,5 GHz”. Para conseguir este propósito, se desarrolla una metodología de investigación cuantitativa, cuyos planteamientos son de naturaleza exploratoria y descriptiva, haciendo uso de las plataformas MATLAB y CST Studio para realizar la simulación y caracterización del arreglo de haz conmutado, equipos analizadores de Keysight Technologies, y las plataformas LabVIEW Communications y GNU Radio para general las señales de prueba, medir y evaluar el enlace bidireccional entre el dron y la estación terrena, y viceversa.

El documento se encuentra dividido en 4 capítulos. El primer capítulo presenta la formulación del proyecto, con los objetivos, antecedentes y justificación del desarrollo del trabajo de grado. El segundo capítulo muestra el marco de referencia para entender las temáticas y conceptos relacionados con las antenas inteligentes, y los arreglos de antenas de haz conmutado; de manera que, se comprendan las definiciones fundamentales, y el estado del arte actual de estos tópicos. El tercer capítulo se centra en la metodología del trabajo: el diseño y las simulaciones necesarias para la construcción y la caracterización de parámetros de las antenas y de los arreglos inteligentes de haz conmutado, tanto en la parte de cálculos, como en los programas de simulación utilizados. Finalmente, el cuarto capítulo muestra las pruebas realizadas con los arreglos inteligentes y los

resultados obtenidos de estas pruebas; así mismo, la discusión de resultados. El documento cierra con las conclusiones y los trabajos futuros.

Capítulo 1. Formulación del proyecto

En este capítulo se resume la formulación del proyecto, entre estos se encuentran los antecedentes de la comunicación de drones y aplicaciones, la justificación del desarrollo del trabajo de grado, posteriormente, se presenta la pregunta de investigación, las hipótesis de trabajo, el objetivo general y los objetivos específicos del proyecto.

1.1. Antecedentes

La utilización de drones para agricultura de precisión es una nueva tendencia mundial que poco a poco empieza a incursionar en Colombia. La unión entre la agricultura y la electrónica, conocida como agrónica, es un proceso que permite facilitar y automatizar algunas actividades que anteriormente eran realizadas de manera empírica o, en el mejor de los casos, con métodos sencillos pero dispendiosos que ocasionan costos altos para el productor e importantes inversiones de tiempo.

Dentro de estos procesos, el sensado de variables como temperatura, iluminación, humedad, gases presentes en el lugar del cultivo, se hace tradicionalmente con equipos independientes para cada una, en momentos diferentes y en muchas ocasiones sin la posibilidad de solucionar un cambio no deseado de variable en tiempo real. Son conocidos los casos en que el agricultor mide la temperatura a la cual se encuentra su cultivo, la encuentra un poco elevada y decide encender el aspersor, sin conocer la humedad de la tierra, lo que puede ser contraproducente a largo plazo para el crecimiento de las plantas.

El reto que plantea esa situación es presentarle al agricultor soluciones desde el área de la electrónica donde la medición de variables se haga de manera conjunta, integrada y permita su observación en tiempo real, desde cualquier lugar, de manera que pueda tomar acciones en el menor tiempo posible para beneficio de sus plantas, contribuyendo a ahorros en dinero y tiempo empleado.

Los drones se muestran como una de las posibilidades que ofrece la tecnología con este fin, permitiendo que el usuario pueda observar todo lo que sucede en sus cultivos. Para esto, se hace necesaria la presencia de una comunicación confiable con una baja tasa de error entre el dron y las antenas. La comunicación dron-antena es el punto fundamental para que este sistema sea considerado

en términos de confiabilidad, disponibilidad y continuidad para el agricultor-de manera que, el usuario pueda acceder a los datos analizados que le entreguen los sensores relacionados al cultivo.

Entre los estudios realizados sobre comunicación entre drones y estaciones fijas, se pueden identificar los siguientes:

Transmisión entre un dron y una estación.

Los sistemas de comunicaciones inalámbricas que incluyen UAV's (*Unmanned Aerial Vehicle*, vehículo aéreo no tripulado) pueden proveer conectividad inalámbrica con una relación costo efectiva para dispositivos sin cobertura de infraestructura. En la Figura 1 se muestran tres casos en los que los drones apoyan las comunicaciones inalámbricas: a) cobertura apoyada por UAV en todas partes al mismo tiempo; b) retransmisión apoyada por UAV; y c) Recolección de datos y diseminación de información apoyada por drones. (Zeng, 2016).

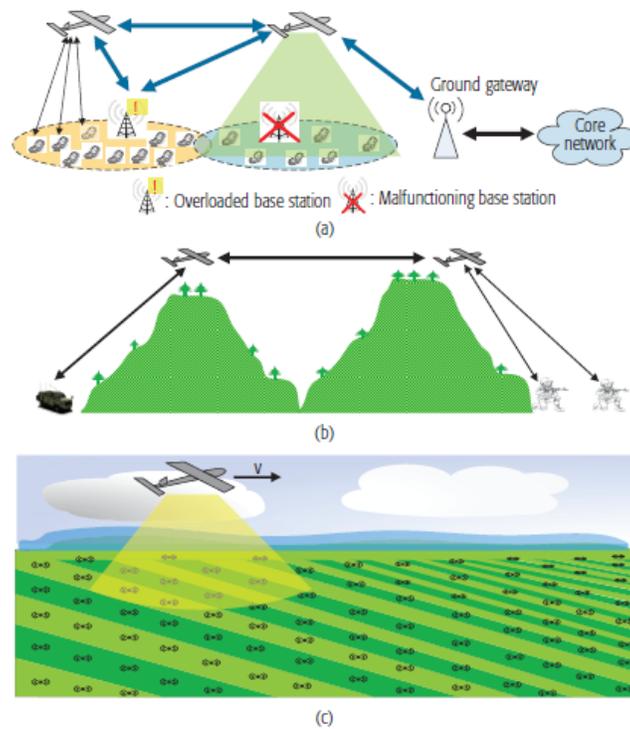


Figura 1. Casos de usos típicos de drones en comunicaciones inalámbricas (Zeng, 2016).

Park (2009) analiza diferentes sistemas de modulación para comunicación entre drones y encuentra que la tecnología WiBro, que es un sistema basado multiportadora basado en OFDM (Multiplexación por división de frecuencias ortogonales) que compensa de manera efectiva la distorsión de las señales causadas por el efecto *Doppler* y el desvanecimiento multitrayectoria, además que tiene una movilidad y autonomía de funcionamiento excelente que puede ser aplicada para los sistemas de comunicación en los drones.

Los drones también pueden apoyar la red celular, teniendo en cuenta las restricciones de capacidad y energía de la red, usando bandas de frecuencia no ocupadas como la de 3,5 GHz y la de 60 GHz, con una arquitectura de modelo como se muestra en la Figura 2. Cada banda presenta sus propias características: la banda de 3,5 GHz se ve limitada por el uso total de los bloques de recursos y la de 60 GHz se ve limitada por la disminución en las distancias de trabajo debida a las pérdidas por espacio libre. (Castellanos et al. 2019).

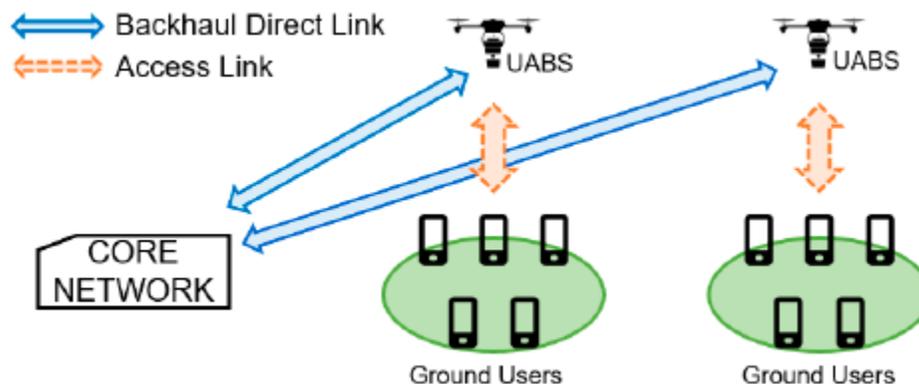


Figura 2. Arquitectura para redes apoyadas por drones. (Castellanos et al. 2019).

Una de las empresas más conocidas en la fabricación y comercialización de drones es la compañía china DJI. Los drones DJI utilizan frecuencias de comunicación normalmente en el rango de los 2,4 y 5,8 GHz con el estándar Wi-Fi para enlazar los controles remotos con el vehículo y para transmitir video HD en formato MPEG-4 AVC/H.264 desde una cámara montada en el dispositivo. El DJI Spark, dron que cuenta con 4 hélices y autonomía de vuelo de hasta 15 minutos, tiene una frecuencia de funcionamiento desde 2,4 a 2,4835 GHz y hasta 5,725 a 5,825 GHz (DJI, 2017). Usa antenas

omnidireccionales, por lo que la eficiencia de la comunicación de los drones puede ser mejorada mediante el uso de antenas directivas, específicamente diseñadas para las frecuencias seleccionadas de operación, minimizando la aparición de interferencias o ruido proveniente de otras señales que estén en bandas de frecuencia cercanas.

Los drones pueden ser usados también como transmisores de señales celulares en situaciones de desastre en las que las estaciones base han sido afectadas, mediante inteligencia artificial y aprendizaje conductual, donde los paquetes son retransmitidos por el dron hacia un equipo de usuario, proporcionando conectividad, minimizando pérdidas en la transmisión de paquetes de datos, disminuyendo el consumo de energía y aumentando el tiempo en el que se mantiene el enlace entre el dron y el equipo celular del usuario. Utilizan los UAV de ala fija de despegue y aterrizaje vertical (VTOL) debido a su capacidad para realizar movimientos verticales y horizontales (en vuelo estacionario), su capacidad para cambiar instantáneamente la dirección de su vuelo y la transición entre el movimiento y el vuelo estacionario, su rápida velocidad para llegar al área impactada en poco tiempo y la eficiencia de la vida útil de la batería. El UAV actúa como un servidor para transmitir la información en cola a la BS vecina que no se ha visto afectada en el desastre, como se muestra en la Figura 3. Se concluye que este enfoque para una comunicación asistida por UAV en un área remota donde un desastre natural ha dañado las estaciones base permite apoyar la comunicación con los equipos de usuario, mediante el entrenamiento del dron utilizando una red neuronal profunda basada en el conocimiento y las trayectorias de un experto humano. La estrategia del UAV es seleccionar un UE en el momento adecuado para minimizar la tasa de caída de paquetes, prolongar la vida útil de la batería del UAV y minimizar el número de conmutadores entre diferentes equipos de usuario. (Shamsoshoara et al., 2021).

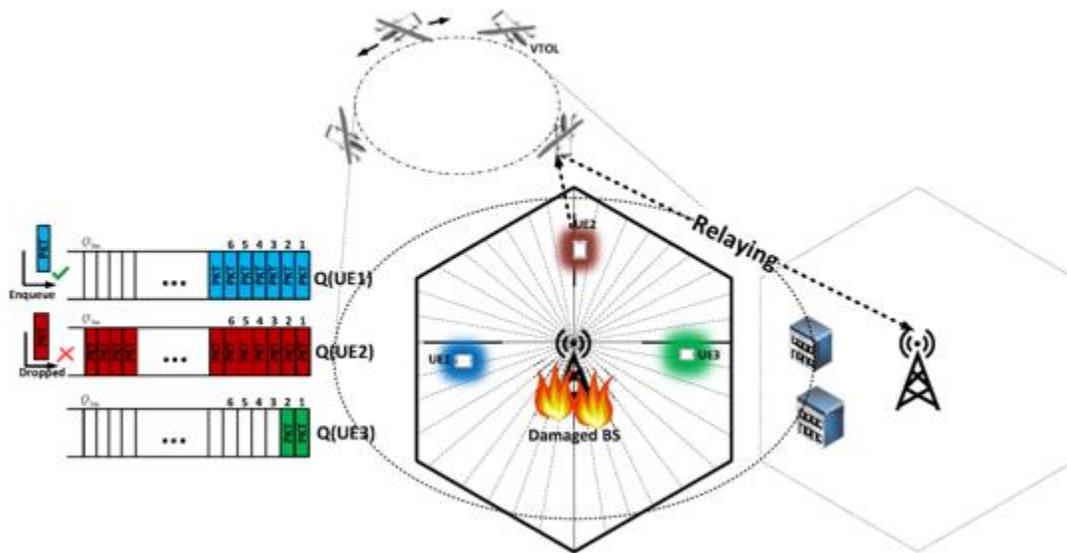


Figura 3. Esquema de comunicación asistida por drones en zona de desastre. (Shamsoshoara et al., 2021).

Se ha propuesto el uso de inteligencia artificial para el control y manejo de redes de comunicaciones basadas en drones, entre los que se encuentran el aprendizaje automático (ML, *machine learning*) que implementa el aprendizaje federado (FL, *federate learning*), que fue propuesto por Google en 2016 y diseñado para admitir sistemas de red con datos descentralizados. FL se considera una configuración de ML con el objetivo de entrenar un modelo altamente centralizado en dispositivos que comparten datos descentralizados sin la necesidad de enviar los datos a una unidad compartida local, de manera segura en redes de comunicaciones basadas en drones. Para solucionar las dificultades en la detección y el seguimiento de los drones que pertenecen a estas redes de comunicaciones se presenta un sistema de detección de UAV en tiempo real basado en el análisis de los datos de sonido provenientes del dron. Para ello, se han aplicado y comparado dos métodos ML en términos de precisión. El primer paso consiste en detectar el potencial UAV existente analizando la frecuencia y luego verificar si el sonido supera un umbral predefinido para drones. El segundo método se basa en el algoritmo aplicado a la Transformada Rápida de Fourier FFT y mide la distancia media con el objetivo. (Lahmeri et al, 2021).

La integración de drones que recopilan datos de sensores para aplicaciones de internet de las cosas (IoT) es un problema desafiante, por ello Bayerlein et al. (2021) proponen un aprendizaje por refuerzo de múltiples agentes (MARL), donde se formula la planificación de rutas para un equipo cooperativo, no comunicativo y homogéneo de UAV con la tarea de maximizar los datos recopilados de los nodos de sensores de IoT distribuidos, sujetos a restricciones de tiempo de vuelo y prevención de colisiones. Esto impone restricciones desafiantes en el diseño de la trayectoria de los vehículos aéreos no tripulados autónomos. Además, la densidad de energía limitada de la batería a bordo restringe severamente la duración de la misión para drones de tipo quadcopter o de cuatro hélices integradas. Al mismo tiempo, el complejo entorno urbano plantea desafíos para evitar obstáculos y respetar las zonas de exclusión aérea (ZLAN) reglamentarias. Se busca el procesamiento de la información de mapa donde los UAV pueden encontrar trayectorias eficientes que equilibran la recopilación de datos con las restricciones de seguridad y navegación.

Stefanovic et al. (2021) analizan el marco matemático para la evaluación del rendimiento de las comunicaciones UAV-tierra sobre canales de desvanecimiento de doble sombra y dispersión sencilla (DS-SS, *double shadow*) y doble sombra de doble dispersión (DS-DS, *double scattering*). Proporcionan la función de densidad de probabilidad (FDP), la función de distribución acumulativa (FDC), la duración promedio del desvanecimiento (DPD) y la tasa de cruce a nivel (TCN) del producto de Nakagami-m doble (ND) y Gamma inversa simple (GIS). procesos aleatorios (PA), así como el producto de DN y RP de doble gamma inversa (DGI). también se investiga el impacto de diferentes valores de severidad de desvanecimiento de doble sombra y doble dispersión (DS-SS) y doble sombra de doble dispersión (DS-DS) en las medidas estadísticas de segundo orden (SO). Todos los resultados analíticos de las estadísticas de SO son confirmados por simulaciones de Monte-Carlo, cuyo modelo se muestra en la Figura 4. Los resultados numéricos muestran que las expresiones analíticas exactas encajan bien con las aproximaciones, especialmente para las expresiones LCR. Los resultados estadísticos de SO presentados se comparan con simulaciones de Monte-Carlo. Además, el creciente número de vehículos aéreos no tripulados también puede proporcionar mejoras en el rendimiento del sistema.

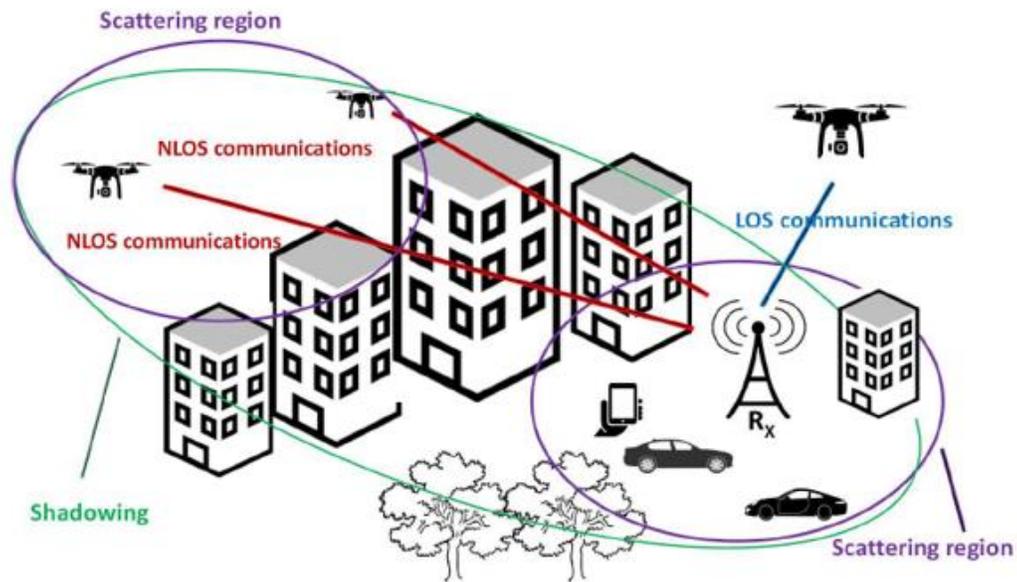


Figura 4. Modelo simplificado para comunicaciones entre dron-tierra con selección de dron.
(Stefanovic et al., 2021).

La implementación de redes de sensores en drones y la recopilación de datos asistida por UAV de múltiples nodos de sensores inalámbricos, donde un UAV de antena única suministra energía para la transmisión de datos a todos los nodos de sensores ubicados en el área de cobertura, con lo cual los nodos de sensores envían su información al UAV. Se pueden usar varios esquemas de transmisión, incluido NOMA (acceso múltiple no ortogonal), así como la retransmisión cooperativa, junto con dos estrategias representativas de emparejamiento de nodos de sensores. Se propone una altura fija de operación del dron de 600 m, donde si el UAV opera a menor altitud, el ángulo de elevación entre los nodos de sensores inalámbricos y UAV se hará más pequeño, lo que conducirá a la disminución del factor de línea de vista (LoS); sin embargo, en el caso de una mayor altitud, la distancia entre los nodos sensores inalámbricos y el UAV aumenta, lo que también disminuye la potencia recibida asociada con el aumento de la pérdida de trayectoria en el espacio libre. Por tanto, existe una altitud óptima, que se identificará mediante análisis numérico. Se asume que el UAV que realiza la recolección de datos está equipado con una sola antena. Si el UAV estuviera equipado con múltiples antenas, se podría mejorar el rendimiento mediante la formación de haces. Este modelo se muestra en la Figura 5. (Shen et al., 2021).

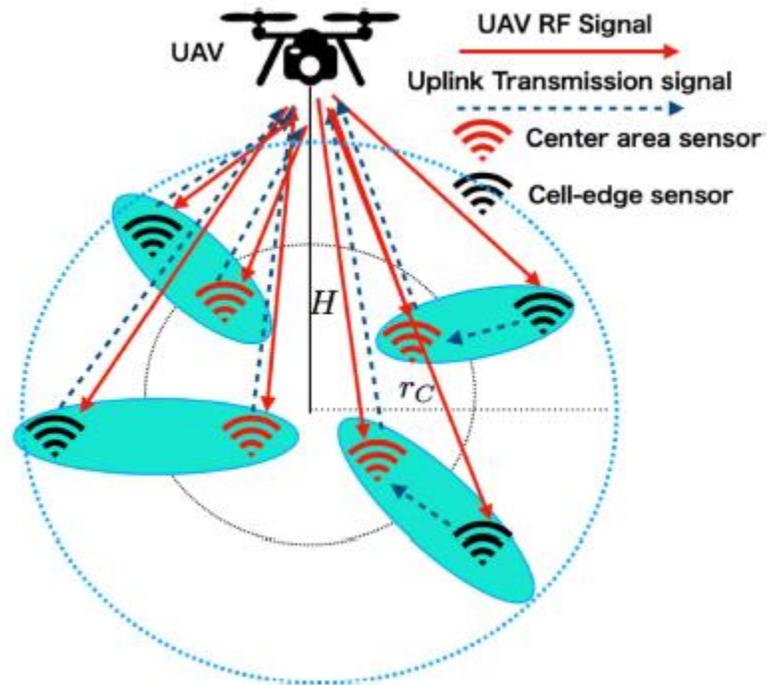


Figura 5. Modelo del sistema de comunicaciones entre un dron y una red de sensores. (Shen et al., 2021).

Castellanos et al. (2021) proponen un sistema de comunicación en la que una estación base de telefonía celular es ubicada en drones para su uso en lugares con alta afluencia de personas que hacen uso de la red, donde los drones tienen una altura de trabajo de 80 m. De igual manera, para aplicaciones de agricultura de precisión con la participación de drones y sensores ubicados de manera subterránea, se concluye que la altura de vuelo óptima está localizada entre 60 m y 80 m. los drones de este sistema recolectan la información proveniente de os sensores que se encuentran enterrados y los envían a una estación base específica, como se muestra en el modelo de la Figura 6. Hace uso de un dron de referencia MD4-100 de tipo quadcopter (de cuatro hélices) que tiene una velocidad promedio de 12 m/s, un tiempo máximo de vuelo de 2400 segundos, batería con una capacidad de 17,3 Ah y voltaje de 22,2 V. (Castellanos et al., 2020).

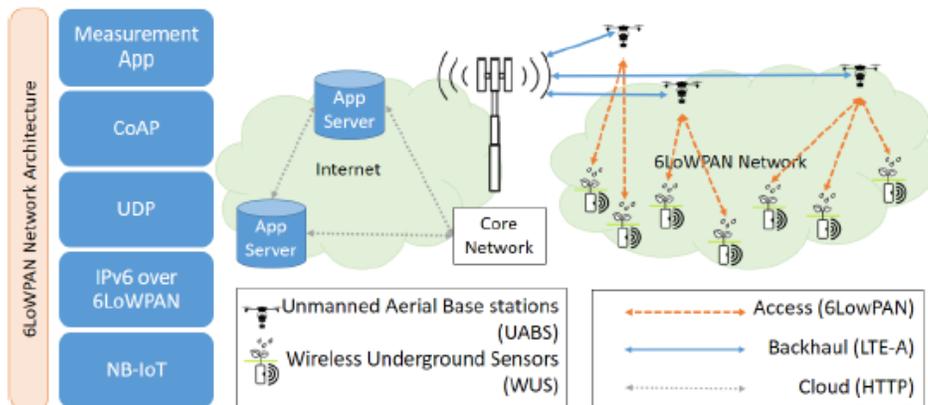


Figura 6. Arquitectura de la red apoyada por drones para uso en aplicaciones de agricultura.
(Castellanos et al., 2020).

Arreglos de antenas para uso en drones.

Debido a la necesidad de una conectividad confiable entre los drones y los terminales terrestres para que haya un intercambio de datos seguro entre ellos, es importante la selección correcta de las antenas o arreglos de antenas que se vayan a ubicar en el dron. Para esto, se debe iniciar con la caracterización del canal de radio aire a tierra, entre el UAV y la estación terrena, como se muestra en la Figura 7. El bajo rendimiento en el enlace entre un dron y una estación terrena pueden ser compensadas mediante el uso de antenas directivas con inclinación, lo que atenúa las señales interferentes y aumentan los niveles de la relación señal a ruido del enlace. (Vinogradov et al., 2018).

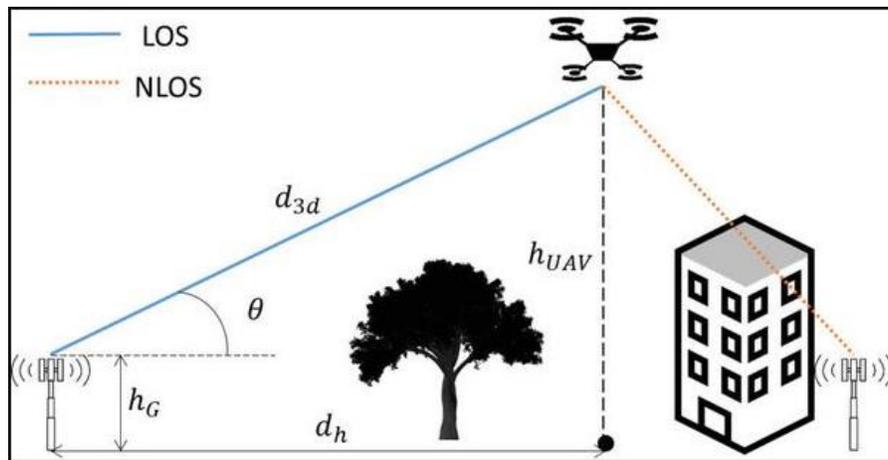


Figura 7. Modelo de propagación aire a tierra. (Vinogradov et al., 2018).

Estudios realizados en Arabia Saudita (Ibrahim, Deif y Sharawi, 2012) sobre arreglos de antenas para vehículos aéreos no tripulados, demuestran que los arreglos planos son fundamentales para no afectar la aerodinámica del dron en el vuelo, por lo que se deben integrar de la mejor manera posible al fuselaje de la aeronave. También debe tenerse en cuenta el peso del arreglo, ya que un arreglo demasiado pesado no permitiría el despegue de la aeronave. Sólo así puede asegurarse las condiciones óptimas en cuanto a interferencias en el vuelo del dispositivo. En la Figura 8 se puede observar el arreglo de 14 elementos sobre el plano propuesto para ser ubicado en un vehículo aéreo no tripulado.



Figura 8. Arreglo de 14 elementos para ser ubicado en un dron. (Ibrahim, Deif y Sharawi, 2012).

Para la alimentación de los elementos del arreglo se dispone de una red de alimentación en la modalidad de red de alimentación colectiva. Se usan líneas terminadas en punta para el acople de los elementos de 100Ω del parche a la entrada del SMA hembra 50Ω y transformadores de impedancia de un cuarto de longitud de onda, para modificar la fase del arreglo variando la distancia entre los elementos tipo parche. Un modelo de arreglo que sigue estas indicaciones es propuesto por Jackson (2006), cuya disposición del arreglo de 4 parches rectangulares se muestra en la Figura 9.

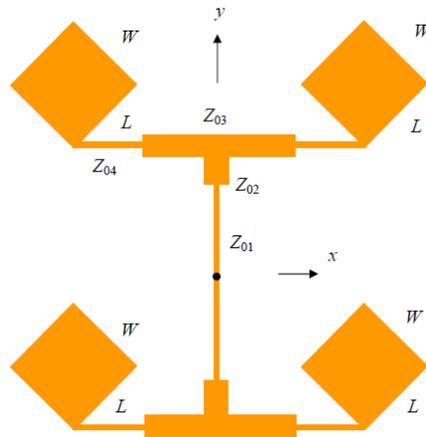


Figura 9. Arreglo de 4 elementos de parche rectangular. (Jackson, 2006).

El espaciado entre los elementos es $\lambda_0/4$ en ambas direcciones y hay un acople de 50Ω en el punto de alimentación central. La impedancia característica de cada línea que conecta a los parches (línea 4) es de $Z_{04} = 100 \Omega$. La longitud de esta línea es $L_4 = \lambda_4/4$, donde λ_4 es la longitud de onda guiada en la línea 4. La línea 3 tiene una impedancia que se acopla cuando se conecta a la línea 4, por lo que la impedancia de la línea 3 es diferente a la de la línea 4. La longitud de la línea 2, con su impedancia característica Z_{02} es $L_2 = \lambda_2/4$, donde λ_2 es la longitud de onda guiada en la línea 2. Esta línea actúa como un transformador de cuarto de onda para acoplar a la impedancia de la línea 1, que es $Z_{01} = 100 \Omega$. La alimentación está localizada simétricamente en la dirección vertical a lo largo de la línea 1. (Jackson, 2006).

Se proponen arreglos de antenas de tipo *microstrip* de dos parches que funcionan a una frecuencia central de 5,8 GHz para aplicaciones del Internet de las Cosas (IoT) que incluyen a drones. Estos arreglos, mostrados en la Figura 10 presentan una ganancia de 7,63 dBi, un ancho de banda de 458 MHz y una eficiencia de radiación de 0,97, son fabricados en sustratos DiClad 880 y en Duroid 5880. (Olan Nuñez, 2019).

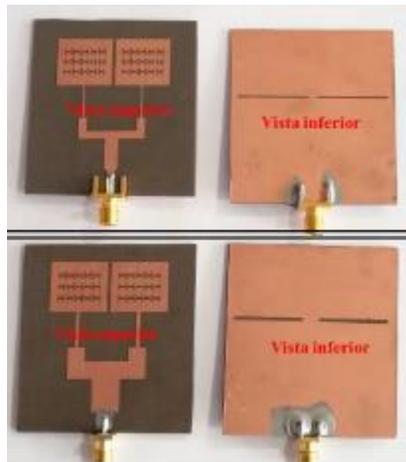


Figura 10. Arreglos de antenas para IoT (Olan Nuñez, 2019).

1.2. Justificación

El diseño propuesto busca suplir la necesidad de ofrecer una comunicación confiable, disponible y continua en las frecuencias de microondas en la banda de 3,5 GHz entre el dron y la antena, la intencionalidad es la solución de una interfaz del enlace que no se tiene en el momento.

Los sistemas de comunicaciones móviles tienen que enfrentarse a varios problemas, entre ellos el desvanecimiento o atenuación muy alta de la señal, la distorsión de esta o la interferencia de unos usuarios con otros. Los sistemas convencionales de antenas buscan la cobertura de amplios sectores espaciales, lo que permite la aparición de dichas dificultades en la señal. Los sistemas de antenas inteligentes buscan solucionar los problemas mencionados, ya que no disponen un diagrama de radiación fijo, sino que son capaces de generar o seleccionar haces muy directivos enfocados hacia el usuario deseado, con adaptación a condiciones radioeléctricas.

Se hace necesario el uso de algoritmos de conmutación de antenas, para la determinación del ángulo de llegada de la señal, teniendo en cuenta el elemento del arreglo que actúa en el momento, dirigiendo el lóbulo en ese ángulo. La conmutación del lóbulo principal se hace con la magnitud y la fase a la que llegan las señales transmitidas a los elementos del arreglo de sensores, o con la medición de la potencia recibida.

Para el proceso de detección, el nivel RSSI (*received signal strength indicator*, indicador de intensidad de la señal recibida) presente en el dron (punto móvil) favorece la eficiencia en la transmisión y recepción gracias a la directividad del arreglo de antenas según la posición donde se encuentre el dron en cada momento. De esta manera, se busca la mayor ganancia de la antena debido a su alta directividad lo que conlleva a la optimización del sistema de comunicaciones. El RSSI es una técnica de detección de fuerza de señal recibida que mide la potencia presente en una señal y puede ser usado para determinar la localización de una transmisión de manera eficiente y económica, siendo un indicador de los niveles de potencia que son recibidos por el receptor, por eso, a mayor RSSI, mayor fuerza en la señal. De esta manera, en el arreglo de antenas se busca ver el RSSI de cada elemento del arreglo y de esta manera conmutar para el elemento que mayor nivel esté recibiendo.

1.3. Pregunta de investigación

En el contexto mencionado anteriormente, se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el diseño de un arreglo de antenas inteligentes más adecuado para una comunicación en microondas en la banda de 3,5 GHz para un enlace aire-tierra?

Las hipótesis de trabajo son:

- El uso de un sistema que contenga un arreglo de antenas inteligentes de haz conmutado puede ser adecuado, usando un algoritmo de conmutación.
- La aplicación de la técnica de RSSI en los elementos del arreglo de antenas puede ser un buen mecanismo para estimar la ubicación de la estación terrena fija.
- El uso de un arreglo con un número de 4 y 6 elementos puede ser más apropiado para el enlace en frecuencia de microondas.

Para resolver este cuestionamiento es fundamental tener en cuenta los parámetros de entrada del sistema, los anchos de bandas deseados en microondas y el acoplamiento mutuo de impedancia entre todos los elementos del arreglo de antenas con la línea de transmisión. Es ideal que los elementos del arreglo presenten impedancias bajas. Otro aspecto importante es el tamaño del arreglo, la eficiencia de este, y las pérdidas presentes en el enlace en esa banda de frecuencias.

El arreglo de antenas y sensores define una disposición de elementos idénticos que guardan distancias en el espacio, es decir, son equidistantes. Se busca que se forme un patrón de radiación directivo, determinado por el factor de radiación de cada uno de los componentes del arreglo, limitado a línea de vista entre el dron y la antena de la estación fija, con pruebas de laboratorio controladas, esto debido a que el proyecto puede aplicarse a cultivos tradicionales.

El problema a resolver se aborda desde un tipo de investigación cuantitativa, que comprende cuatro fases de desarrollo y que permite obtener como producto tangible el arreglo de antenas inteligentes de haz conmutado más adecuado para las frecuencias de la comunicación de drones en microondas.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar, construir y evaluar un arreglo de antenas inteligentes para la comunicación entre un dron y una estación terrena fija en la banda de 3,5 GHz.

1.4.2. Objetivos específicos

- Apropiar conocimiento acerca del estado del arte de las temáticas referentes a arreglos de antenas, RSSI, algoritmos de conmutación de sensores y desarrollos en comunicación de drones con antenas terrenas fijas.
- Diseñar e implementar los arreglos de antenas y la metodología de sensórica RSSI más adecuados según la frecuencia de trabajo seleccionada, mediante simulación en software y posterior fabricación.
- Integrar el sistema de los arreglos con el diseño y ejecución del algoritmo que permite identificar la dirección y posición de la señal que se recibe en los sensores para el monitoreo de señal proveniente de la antena fija y la conmutación del arreglo de antenas del dron.

- Validar el enlace de microondas bidireccional entre el dron y la antena terrena fija con el sistema realizado, mediante pruebas específicas que cumplan con los parámetros de calidad del enlace.
- Redactar el artículo de publicación y el informe correspondiente a los resultados obtenidos, de manera que el proyecto se convierta en referente para trabajos similares sobre la comunicación de drones en microondas.

Capítulo 2. Marco teórico

En este capítulo se muestran los conceptos que son el marco de referencia para la comprensión de las temáticas relacionadas con el trabajo de grado, incluyendo la definición de antenas inteligentes, arreglos de antenas, comunicación entre drones, estrategias de detección de señales y estado del arte en general de propuestas relacionadas con este campo.

2. 1. Antenas inteligentes

Una antena inteligente es la combinación de un arreglo de antenas (*arrays*) con una unidad de Procesamiento Digital de Señales (DSP) que optimiza los lóbulos de transmisión y recepción dinámicamente en respuesta a una señal de interés en el entorno. (Guitál, 2007).

El esquema de funcionamiento de un arreglo de antenas inteligentes que se muestra en la Figura 11 consta de n antenas que reciben varias señales y son procesadas mediante algoritmos en el DSP para su uso posterior.

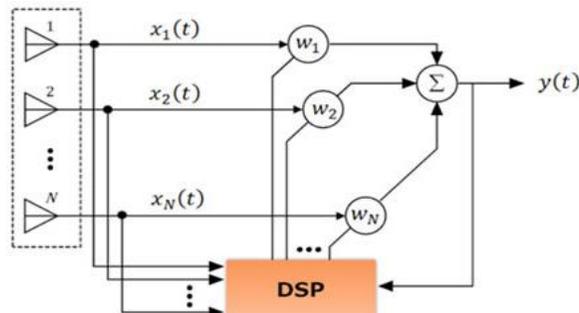


Figura 11. Esquema del funcionamiento de un arreglo de antenas inteligentes. (Guerra, 2013).

Después de que el procesador digital de señales mide los retrasos de tiempo de cada elemento de antena, computa la dirección de llegada de la señal de interés y entonces ajusta las excitaciones (ganancias y fases de las señales) para producir un patrón de radiación que se centra en la señal de interés, mientras que, de manera ideal, no sintoniza ninguna señal que no sea de interés. (Balanis, 2005).

Los sistemas de antenas inteligentes proporcionan oportunidades para incrementar la capacidad del sistema de redes inalámbricas, proporcionando calidad de servicio y control de potencia. (Guital, 2007). Un ejemplo que ilustra el funcionamiento del sistema de arreglos propuesto se encuentra en las comunicaciones móviles 4G, donde la estación base del operador (punto fijo) se encuentra monitoreando dónde se encuentran sus usuarios (punto móvil) de manera que optimiza los niveles de señal de acuerdo a la posición y número de usuarios en la zona.

2.1.1. Tipos de antenas inteligentes.

Los sistemas de antenas inteligentes se clasifican en tres tipos:

- Haz Conmutado. (*Switched-Beam*):

El sistema de antenas inteligentes de haz conmutado genera varios haces a ángulos prefijados que se van conmutando secuencialmente dando como resultado un barrido discreto de la zona de cobertura en posiciones angulares fijas, como se muestra en la Figura 12.

En cada posición discreta del haz se activa el sistema de recepción para detectar la posible existencia de señales. En caso de recibir señal, el sistema guarda información correspondiente a la posición del haz (ángulo + identificación de usuario) y se establece la comunicación con el usuario en un intervalo de tiempo. Después de este intervalo se conmuta al siguiente haz para detectar la existencia de otros posibles usuarios hasta llegar al límite angular de la zona de cobertura. Los cambios de fase en este tipo de antena son constantes. Este proceso se repite permanentemente en el tiempo.

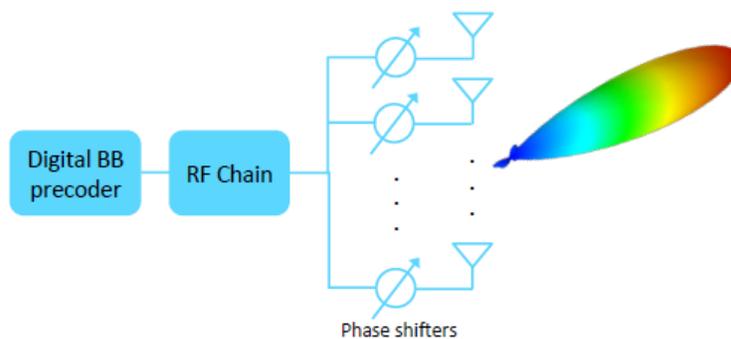


Figura 12. Sistema de haz conmutado. (Widmer, 2017).

- Haz de Seguimiento:

Este sistema es un poco más complejo que el anterior, ya que está conformado por un arreglo de antenas con una red de excitación que permite controlar electrónicamente las fases de las señales de excitación que llegan a los elementos del arreglo para modificar la dirección del haz convenientemente y establecer comunicación con el usuario respectivo. La suma de los haces estáticos desfasados eléctricamente produce un desfase angular, que a diferencia del anterior el cual tiene un número discreto y limitado de ángulos, en la zona angular de cobertura todos están excitados simultáneamente lo cual produce un cubrimiento total y continuo de la zona angular de cobertura, y la amplitud sumada al desfase generan el ángulo, como se muestra en la Figura 13.

A diferencia del sistema de haz conmutado, el sistema haz de seguimiento ejecuta algoritmos DoA (*Direction of Arrival*) para identificar la dirección de arribo de las señales de los usuarios. Otra diferencia es que los cambios de fase en el sistema conmutado se realizan a ángulos fijos, es decir corresponden a ángulos prefijado en el sistema y en el sistema de haz de seguimiento el posicionamiento del haz tiene mayor resolución angular.

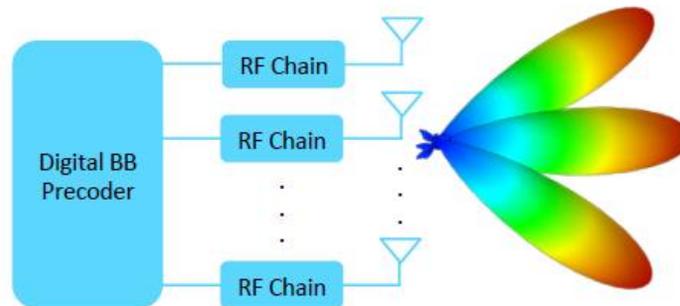


Figura 13. Sistema de haz de seguimiento. (Widmer, 2017).

- Haz Adaptativo:

La técnica de haz adaptativo constituye el máximo nivel de inteligencia que se podría dar a un sistema de antenas. En este sistema, las salidas de cada elemento del arreglo de antenas se ponderan con un factor de peso cuyo valor se asigna dinámicamente para conformar un diagrama de radiación donde

el lóbulo principal este enfocado hacia la posición del usuario deseado, los haces o lóbulos secundarios hacia las direcciones de las componentes de multitrayecto de la señal deseada y mínimos o nullos de radiación en las direcciones de las fuentes de interferencia, como se observa en la Figura 14. Los sistemas de arreglos adaptativos pueden personalizar un patrón de radiación adecuado para cada usuario de manera independiente (Balanis, 2005).

Esta técnica requiere el uso de algoritmos (DoA) tanto para la detección de las señales de arribo e interferentes como para la optimización de los pesos que conforman el haz. Los sistemas de arreglos adaptativos pueden localizar y rastrear señales (usuarios e interferentes) y ajustar dinámicamente el patrón de la antena para mejorar la recepción mientras que minimizan la interferencia usando algoritmos de procesamiento de señal.

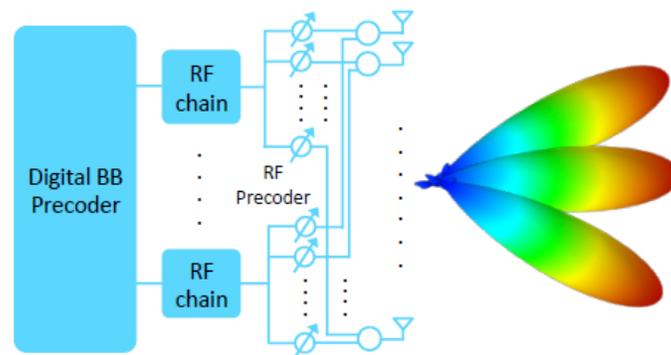


Figura 14. Sistema de haz adaptativo. (Widmer, 2017).

Estos sistemas pueden radiar una potencia menor por lo cual se pueden reducir o simplificar las especificaciones de los amplificadores de potencia asociadas al sistema de antenas, generando una reducción de costos en las etapas de amplificación, así como optimización energética del *link budget*, que es una contabilización de las ganancias y pérdidas desde el transmisor hasta el receptor en un sistema de telecomunicaciones, a través del medio, ya sea espacio libre, cable, guía de onda, etc. Este sistema también tiene en cuenta la atenuación de la señal transmitida debida a la propagación, también como las ganancias de la antena.

Gracias a la directividad obtenida con un arreglo de antenas con respecto al de una antena sectorial, se puede incrementar la zona de cobertura de los equipos receptores, a su vez, dado que la ganancia

es mayor que en el caso de antenas omnidireccionales o sectorizadas, para la misma potencia transmitida, la señal se podría recibir a una mayor distancia, ya que la ganancia relativa de la antena aumenta significativamente, mejorando la ganancia de los componentes del *link budget*, de manera que existe una mayor potencia recibida en el sistema luego de la amplificación de la señal, de acuerdo a (1):

$$Prx = Ptx - Pathloss(d, medio) + Ganancias(antenas y amplificadores). \quad (1)$$

También, gracias a que la transmisión entre la estación y el equipo móvil o dron es direccional, es muy difícil que otro equipo intercepte la comunicación, a menos que este esté situado en la misma dirección en la que apunta el haz de la antena.

2.1.2. Comparación entre los tipos de antenas inteligentes existentes.

La Tabla 1 muestra las diferentes características presentes en cada uno de los tres tipos de antenas inteligentes, en términos de complejidad de elaboración, consumo energético, flujos de datos y generación de los patrones de radiación respectivos.

Tabla 1. Comparación de los tipos de antenas inteligentes. (Widmer, 2017).

Haz Conmutado	Haz de Seguimiento	Haz Adaptativo
<ul style="list-style-type: none"> • Baja complejidad y poco consumo de energía. • Flujo único de datos (no existe ganancia de multiplexado). • Soluciona la generación de patrones de radiación de manera aceptable con una amplitud constante y un cambio de fase en ondas milimétricas de radiofrecuencia de baja resolución. 	<ul style="list-style-type: none"> • Muy alta complejidad y alto consumo de energía. • Múltiples flujos paralelos de datos (ganancia de multiplexado). • Soluciona de manera óptima la generación de patrones de radiación con un control preciso tanto de la amplitud como de la fase de las señales de la antena. 	<ul style="list-style-type: none"> • El número de cadenas de radiofrecuencia es mucho menor que el número de antenas necesarias en el arreglo. • Existe una compensación entre complejidad del arreglo y rendimiento. • Múltiples flujos paralelos de datos (ganancia de multiplexado), como en el caso anterior.

2. 2. Arreglos de antenas

Para aumentar la directividad y ganancia de una antena, se hace necesario incrementar el tamaño eléctrico de la antena. Cuando se alargan las dimensiones de elementos únicos se tiende a conseguir mayores características directivas. Otra manera de aumentar las dimensiones de la antena, sin incrementar necesariamente el tamaño de los elementos individuales, es formar una agrupación de elementos radiantes en una configuración eléctrica y geométrica. Esta nueva antena, formada por múltiples elementos, se denomina arreglo. En la mayoría de los casos, los elementos de un arreglo son idénticos. No es totalmente necesario, pero es a menudo muy conveniente, simple y más práctico. Los elementos de un arreglo pueden ser de cualquier forma, ya sean dipolos, aperturas, etc. (Balanis, 2005).

El campo total del arreglo es determinado por el vector suma de los campos radiados por los elementos individuales. Esto indica que la corriente en cada elemento es la misma que la presente en un elemento individual (sin el acoplamiento). Usualmente, este no es el caso y depende de la separación entre los elementos. De manera que se produzcan patrones de radiación muy directivos, es necesario que los campos de los elementos del arreglo interfieran constructivamente (se sumen) en las direcciones deseadas e interfieran destructivamente (se cancelen unos a los otros) en el espacio sobrante. De manera ideal, esto se puede conseguir, pero de forma práctica sólo se logra una aproximación. En un arreglo de elementos idénticos, hay al menos cinco características que pueden ser usadas para formar el patrón total de la antena, las cuales son:

1. La configuración geométrica del arreglo total (lineal, circular, rectangular, esférico, etc.)
2. El desplazamiento relativo entre los elementos.
3. La amplitud de excitación de los elementos individuales.
4. La fase de excitación de los elementos individuales.
5. El patrón relativo de los elementos individuales.

Cada uno de estos aspectos tiene una influencia clave en las características de radiación totales del arreglo (Balanis, 2005).

2.2.1. Tipos de arreglos de antenas.

Los arreglos de antenas pueden encontrarse en diferentes disposiciones, pueden existir arreglos de antenas lineales como es el caso de los arreglos de antenas Yagi, o pueden existir arreglos de antenas no lineales, como es el caso de arreglos de bocinas o de antenas tipo parche. Su uso depende de las condiciones de trabajo y, en especial, de las frecuencias y directividades que son necesarias en el funcionamiento de la aplicación. Existen tres tipos fundamentales de arreglos de antenas según su geometría: los arreglos lineales, que pueden ser de tipo *broadside* y *end-fire*, los arreglos en el plano o planares y los arreglos de antenas conformados en el espacio.

2.2.1.1. Arreglo *broadside*.

Un arreglo de antenas de tipo *broadside* es una configuración especial en la que las antenas individuales se colocan en línea recta, generalmente espaciadas de manera uniforme, y están alineadas perpendicularmente al plano de radiación principal. Esto significa que el haz principal de radiación del arreglo se dirige directamente hacia adelante, en dirección normal al plano de las antenas.

En muchas aplicaciones se desea tener el máximo de radiación de un arreglo dirigido de forma normal al eje del arreglo (de costado, $\theta_0 = 90^\circ$), como se ve en la Figura 15. Para optimizar el diseño, el valor máximo del elemento individual y el factor del arreglo (AF) deben ser ambos dirigidos hacia $\theta_0 = 90^\circ$. Los requerimientos de los elementos individuales pueden alcanzarse con la elección adecuada de los elementos radiantes, y los requerimientos del factor del arreglo con la separación y excitación adecuadas de los elementos radiantes individuales.

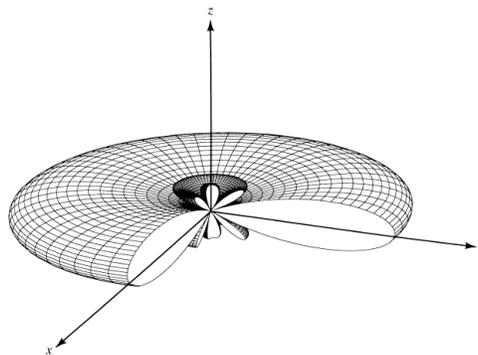


Figura 15. Patrón de radiación de un arreglo *broadside* de 10 elementos. (Balanis, 2005).

El diagrama de radiación muestra un patrón de haz estrecho y simétrico en la dirección del eje principal, lo que indica que la mayor parte de la energía se irradia o se recibe en la dirección normal al plano de las antenas. Presenta una reducción significativa en la radiación en las direcciones laterales, lo que disminuye la susceptibilidad a la interferencia proveniente de fuentes no deseadas ubicadas fuera del plano de radiación.

El ángulo de radiación principal del arreglo de antenas de tipo broadside es de 0 grados, es decir, el haz principal se dirige directamente hacia adelante en relación al plano de las antenas. Suele tener una ganancia alta y directividad en la dirección del haz principal, lo que permite una mayor potencia de transmisión o una mejor sensibilidad de recepción en esa dirección. Este tipo de arreglo es ampliamente utilizado en diversas aplicaciones, como radares direccionales, comunicaciones punto a punto y sistemas de seguimiento de objetos.

2.2.1.2. Arreglo end-fire.

Un arreglo de antenas de tipo end-fire se distingue por su capacidad para generar un haz principal de radiación que se dirige en la dirección de los elementos del arreglo. A diferencia de tener el máximo de radiación al costado del eje del arreglo, puede ser recomendable dirigirlo a lo largo del eje del arreglo (*end-fire*). Puede ser necesario que exista radiación hacia sólo una dirección, bien sea $\theta_0 = 0^\circ$ o $\theta_0 = 180^\circ$, como se observa en la Figura 16.

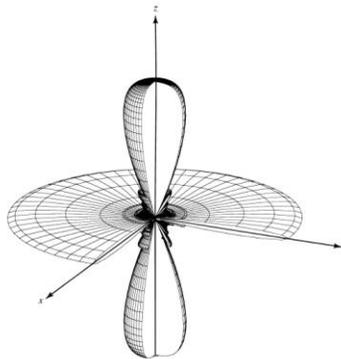


Figura 16. Patrón de radiación de un arreglo *end-fire* de 10 elementos. (Balanis, 2005).

El diagrama de radiación de un arreglo de antenas de tipo end-fire muestra un patrón de radiación con un lóbulo principal estrecho y directivo en la dirección de los elementos del arreglo. Este lóbulo

principal es el resultado de la interferencia constructiva de las ondas generadas por las antenas en fase. El arreglo de antenas de tipo end-fire presenta una reducción significativa en la radiación en las direcciones laterales, lo que ayuda a minimizar la interferencia de señales no deseadas provenientes de ángulos diferentes al de los elementos del arreglo. Este tipo de arreglo es comúnmente utilizado en aplicaciones como antenas direccionales para comunicaciones unidireccionales, radares direccionales y sistemas de formación de haces.

2.2.1.3. Arreglo planar o en el plano

Los arreglos de antenas planares, también conocidos como arreglos en el plano, son configuraciones de antenas que se disponen en un plano bidimensional. En lugar de estar dispuestas en una línea recta, las antenas se colocan en una matriz rectangular o cuadrada en el plano horizontal.

Los arreglos de antenas planares tienen la capacidad de generar haces de radiación altamente directivos en la dirección deseada. Esto se logra mediante la excitación de los elementos del arreglo con fases y amplitudes específicas, lo que permite concentrar la energía en un haz estrecho. Debido a su estructura planar y la posibilidad de utilizar múltiples elementos, los arreglos de antenas planares pueden lograr una alta ganancia. La ganancia se refiere a la capacidad del arreglo para concentrar la energía en la dirección del haz principal, lo que mejora la potencia de transmisión o la sensibilidad de recepción.

El ancho del haz principal del arreglo de antenas planares puede ser ajustado mediante el tamaño y la configuración de los elementos del arreglo. Un arreglo más grande o una mayor separación entre los elementos resultará en un ancho de haz más estrecho, lo que proporciona una mayor directividad y capacidad de focalización. El diagrama de radiación de este tipo de arreglo muestra la distribución de la energía radiada en diferentes direcciones. Normalmente, se observa un lóbulo principal en la dirección del haz deseado, acompañado de lóbulos secundarios en otras direcciones. El control del diagrama de radiación es fundamental para dirigir la señal hacia la zona de interés y minimizar la radiación en direcciones no deseadas.

Los arreglos de antenas planares pueden generar diferentes polarizaciones, como la polarización lineal o la polarización circular. La polarización se determina por la orientación de los elementos del arreglo y la excitación de cada elemento. Los arreglos de antenas planares se utilizan en una amplia

gama de aplicaciones, incluyendo comunicaciones inalámbricas, radares, sistemas de posicionamiento global (GPS) y tecnologías de transmisión de datos. Su estructura plana, directividad ajustable y capacidad de formación de haces los convierten en una opción versátil para implementaciones tanto en sistemas terrestres como en sistemas de satélites.

2.2.1.4. Arreglo conformado en el espacio

Los arreglos de antenas conformados en el espacio son configuraciones de antenas en las que los elementos se colocan en ubicaciones tridimensionales específicas para lograr un control preciso del diagrama de radiación. A diferencia de los arreglos planares o en el plano, los arreglos conformados en el espacio permiten una mayor flexibilidad en la dirección y forma del haz principal. Estos arreglos consisten en un conjunto de antenas colocadas en ubicaciones específicas en el espacio para lograr un rendimiento óptimo en términos de ganancia, directividad y respuesta en frecuencia. Al distribuir las antenas en patrones geométricos precisos, se logra un control más preciso del diagrama de radiación y la formación de haces.

Los arreglos de antenas conformados en el espacio permiten formar haces de radiación en direcciones y formas específicas mediante el ajuste preciso de las amplitudes y fases de los elementos del arreglo. Esto brinda la capacidad de enfocar la energía en áreas de interés y minimizar la radiación en direcciones no deseadas. Con la capacidad de controlar la geometría tridimensional del arreglo, es posible lograr una alta directividad. Esto significa que se puede concentrar la energía en la dirección del haz principal, lo que mejora la ganancia y la sensibilidad en esa dirección.

Los arreglos de antenas conformados en el espacio ofrecen una mejor capacidad para reducir la interferencia de señales no deseadas. Al enfocar el haz principal en la dirección deseada, se minimiza la energía radiada en otras direcciones, lo que reduce la susceptibilidad a interferencias y mejora la relación señal a ruido. Estos arreglos permiten ajustar el diagrama de radiación para adaptarse a diferentes condiciones y requisitos. Esto significa que se puede cambiar la forma, el ancho y la dirección del haz principal según sea necesario para abordar diferentes escenarios de comunicación o detección.

A diferencia de los arreglos planares, los arreglos conformados en el espacio pueden tener una configuración no lineal, lo que permite una mayor libertad de diseño y una mejor adaptación a las limitaciones del entorno.

Su capacidad de controlar y adaptar el diagrama de radiación en el espacio tridimensional los convierte en una herramienta poderosa para mejorar la calidad y eficiencia de las comunicaciones inalámbricas y las aplicaciones de detección. Esto permite direccionar la energía de transmisión y recepción hacia una dirección específica, lo que resulta en una mayor eficiencia y capacidad de transmisión.

Los arreglos de antenas conformadas en el espacio son particularmente útiles en aplicaciones de microondas debido a la capacidad de operar en frecuencias más altas, donde la propagación directa y las limitaciones de interferencia son más pronunciadas. Estos arreglos ofrecen ventajas significativas en términos de rendimiento de enlace, calidad de señal y capacidad de comunicación para aplicaciones críticas como comunicaciones satelitales, radares de alta resolución y sistemas de enlace de datos de alta velocidad en entornos desafiantes. Los arreglos de antenas conformados en el espacio se utilizan en diversas aplicaciones, como radares de apertura sintética (SAR), comunicaciones de haz estrecho, sistemas de detección y seguimiento de objetivos, y sistemas de formación de haces adaptativos.

2.2.2. Antenas tipo parche o *microstrip*.

Las antenas tipo parche o *microstrip* son un tipo de antenas que, debido a sus características de fabricación a través de mecanismos de circuitos impresos, tamaño reducido, poco peso y facilidad de instalación son seleccionadas para aplicaciones de aeronáutica, satélites, telefonía móvil y comunicaciones inalámbricas actuales. Estas antenas son muy versátiles en términos de frecuencia, polarización, diagrama e impedancia, adicionalmente estas antenas mediante la suma de elementos activos como diodos específicos y varactores pueden comportarse como elementos adaptables que pueden variar su frecuencia de resonancia, impedancia, polarización y diagrama de radiación.

Sin embargo, la principal desventaja de estas antenas es su baja eficiencia, reducida potencia y alto Q (en algunas ocasiones superior a 100), baja pureza de polarización, radiación espuria en el punto de excitación y reducido ancho de banda de frecuencia. Por tal razón, es fundamental que se sigan los

parámetros de diseño apropiados, teniendo en cuenta la aplicación para la cual van a ser usadas, de manera que se disminuyan al máximo sus desventajas.

Estas antenas son populares para aplicaciones de bajo perfil a frecuencias por encima de 100 MHz ($\lambda_0 < 3 m$). Comúnmente consisten de un parche rectangular o cuadrado sobre una capa delgada de dieléctrico (llamada el sustrato) en un plano de tierra (Kraus, 2003).

2.2.2.1. Características y diseños de antenas tipo parche.

Típicamente el espesor del sustrato o material en el que se sitúa la antena es una fracción de longitud de onda, de tal manera que puede ser de $h = 0,05 \lambda$ y la longitud del parche es de $L = 0,5 \lambda$. La estructura radia a través de los bordes del parche colocados arriba del sustrato, generando los denominados campos de contorno.

Las antenas *microstrip* se conforman de una tira metálica (parche) muy delgada ($t \ll \lambda_0$, donde λ_0 es la longitud de onda del espacio libre) localizada en una pequeña fracción de una longitud de onda ($h \ll \lambda_0$, usualmente $0,003\lambda_0 \leq h \leq 0,005\lambda_0$) sobre un plano de tierra. El parche se diseña de tal manera que su patrón de radiación máximo sea normal al parche (radiación *broadside*). Esto se consigue eligiendo adecuadamente el modo (configuración de campo) de la excitación debajo del parche. Para un parche rectangular, la longitud L del elemento es usualmente $\frac{\lambda_0}{3} < L < \frac{\lambda_0}{2}$. El parche y el plano de tierra están separados por una lámina dieléctrica conocida como sustrato. La Figura 17 muestra los componentes, dimensiones y sistema de coordenadas de una antena *microstrip* de forma cuadrada.

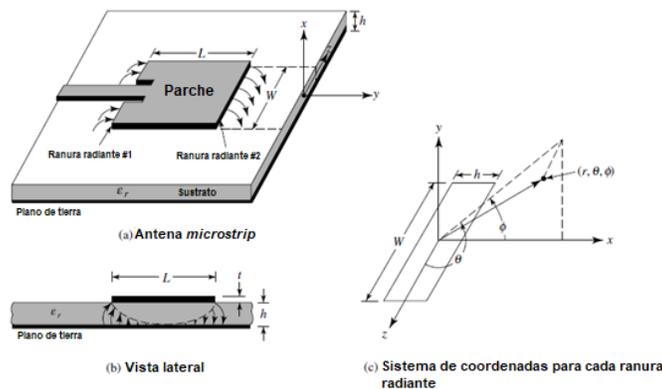


Figura 17. Antena tipo parche, componentes y sistema de coordenadas. (Balanis, 2005).

Los elementos radiantes y las líneas de alimentación son usualmente grabados en el sustrato dieléctrico. El parche radiante puede ser cuadrado, rectangular, de tira delgada (dipolo), circular, elíptico, triangular o de cualquier otra configuración, como se observa en la Figura 18. Los cuadrados, rectangulares, dipolo de tiras y circulares son los más comunes por la facilidad de análisis y fabricación, y por sus características atractivas de radiación, especialmente la baja radiación de polarización cruzada.

Los dipolos en *microstrip* son atractivos porque poseen de manera inherente un amplio ancho de banda y ocupan menos espacio, lo cual los hacen adecuados para arreglos. Polarizaciones lineales y circulares pueden lograrse bien sea con elementos individuales o con arreglos de antenas *microstrip*. Los arreglos de elementos *microstrip*, con alimentaciones individuales o múltiples, pueden ser usados para introducir capacidades de escaneo y lograr mayores directividades.

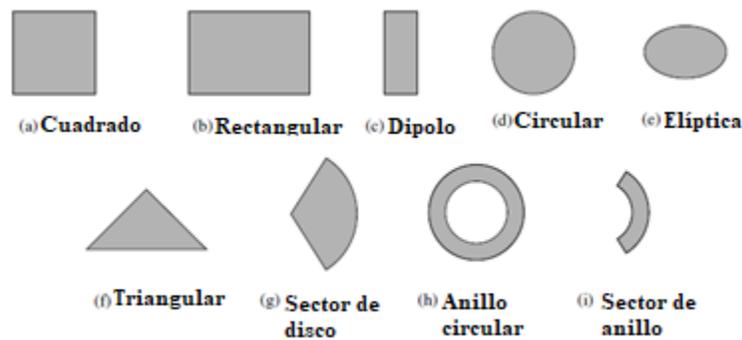


Figura 18. Formas representativas de elementos de antenas *microstrip*. (Balanis, 2005).

Hay muchas configuraciones usadas para la alimentación de antenas *microstrip*. Las cuatro más comunes son: i) la línea *microstrip*, ii) la sonda coaxial, iii) el acoplamiento de apertura y iv) el acoplamiento de proximidad. La línea de alimentación *microstrip* es también una tira conductora, usualmente de un ancho mucho menor comparada al parche. Es fácil de fabricar, simple de acoplar controlando la posición de inserción y bastante sencilla de modelar. Sin embargo, como el espesor del sustrato aumenta, las ondas de superficie y las radiaciones espurias aumentan, lo que para diseños prácticos limita el ancho de banda entre un 2 a 5% del valor nominal.

La alimentación por línea coaxial, donde el conductor interno del coaxial está unido al parche de radiación mientras que el conductor externo se conecta al plano de tierra es ampliamente usada. La alimentación por la sonda coaxial es también fácil de fabricar y acoplar, y tiene baja radiación espuria. Sin embargo, también posee un ancho de banda angosto y es más difícil de modelar, especialmente para sustratos gruesos con $h > 0,02\lambda_0$. La Figura 19 presenta una comparación de las cuatro técnicas de alimentación de antenas *microstrip*.

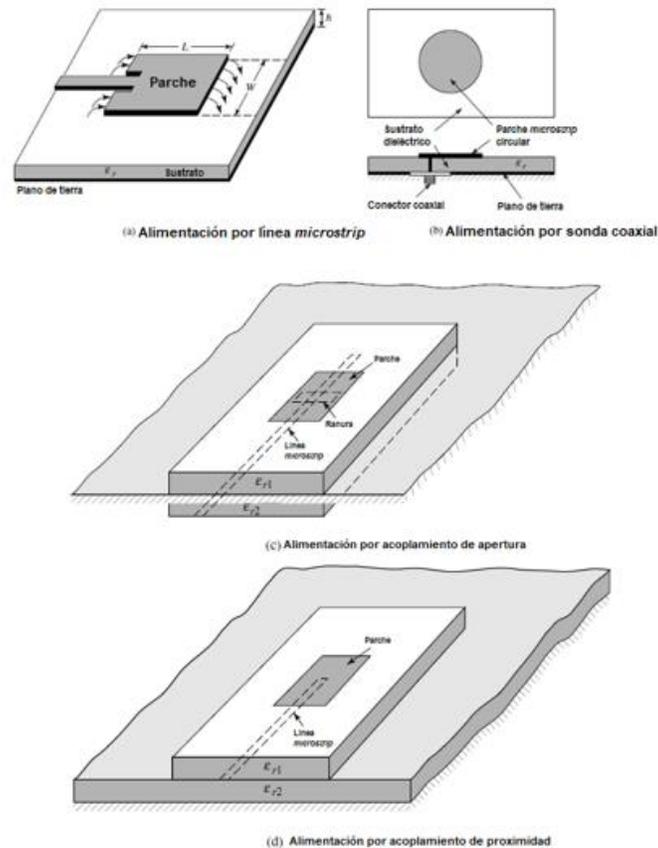


Figura 19. Tipos de alimentación comunes para antenas *microstrip*. (Balanis, 2005).

2.2.2.2. Arreglos de antenas tipo parche.

Las antenas *microstrip* no son usadas solamente como elementos individuales, sino que son muy populares en arreglos. Los arreglos de antenas tipo parche son muy versátiles y son usados para sintetizar un patrón de radiación requerido que no puede alcanzarse con un elemento individual.

Además, son usados para escanear el haz de un sistema de antenas, incrementar la directividad y realizar otras funciones que serían muy complicadas con un elemento individual. Los elementos del arreglo pueden ser alimentados por una línea única o por líneas múltiples en una disposición de red de alimentación. La primera se denomina red de alimentación en serie y la segunda se denomina red de alimentación colectiva. La Figura 20 muestra la comparación entre los dos tipos de redes de alimentación para arreglos de *microstrip*.

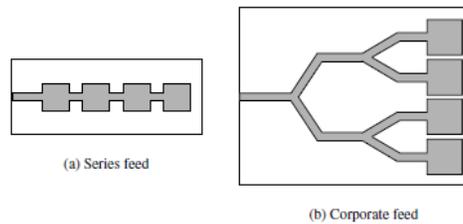


Figura 20. Disposiciones de alimentación para arreglos de antenas *microstrip*. (Balanis, 2005).

La red de alimentación colectiva se usa para proveer divisiones de la energía en razón de 2^n ($n = 2, 4, 8, 16, 32, etc$). Esto se logra usando líneas terminadas en punta que acoplan elementos de 100Ω del parche a una entrada de 50Ω o usando transformadores de impedancia de un cuarto de longitud de onda, como se observa en la Figura 21.

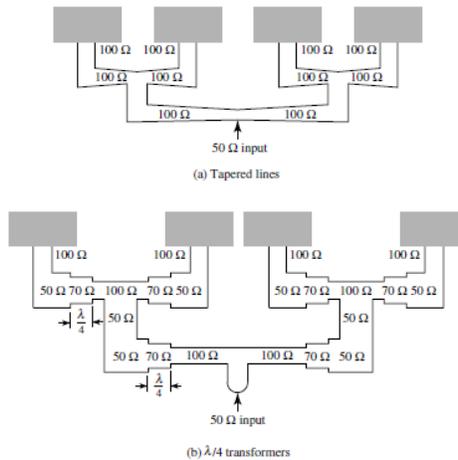


Figura 21. Acoplamiento de parches de 100Ω a una línea de 50Ω . (Balanis, 2005).

Los arreglos de alimentación colectiva son generales y versátiles, ya que con este método se tiene más control de la alimentación de cada elemento (amplitud y fase) y es ideal para arreglos de escaneo

de fase, arreglos de haz múltiple o arreglos de formación de haz. La fase de cada elemento puede ser controlada usando variadores de fase y variando la distancia entre los elementos, mientras que la amplitud de los elementos puede ser ajustada usando amplificadores o atenuadores.

El patrón de radiación típico de un arreglo lineal de antenas *microstrip* se observa en la Figura 22, con sus características de variación en el ángulo de radiación, relacionadas con el número y disposición de los elementos sobre el sustrato.

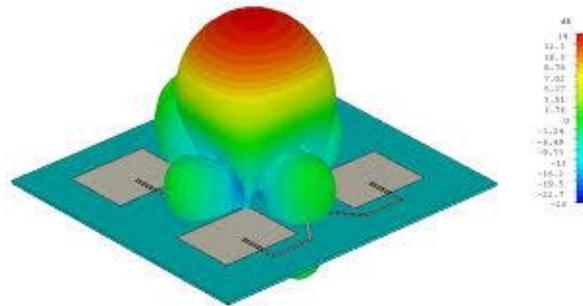


Figura 22. Patrón de radiación típico de un arreglo planar de antenas *microstrip*. (CST Studio)

Existen varios estudios relacionados con el diseño y fabricación de arreglos de antenas de tipo parche o *microstrip*, de los cuales se mencionan algunos a continuación.

Calderón (2014) presenta un diseño de un arreglo de antenas que opera en la banda de microondas, con una frecuencia central de operación de 7.5 GHz. Teniendo en cuenta que los tipos de arreglos que se han diseñado por diversos grupos de investigadores son arreglos de antenas planares o circulares, se encuentra que la simulación de un arreglo circular de 16 antenas, con una Antena de Transmisión (Tx1 a Tx16) y 15 Antenas Receptoras (Rx) que funcionan como sensores o *probes* (P1 a P15), colocadas a 22.5° de distancia entre ellas, no presenta reflexiones espurias en la periferia, y tiene una gran directividad, obteniendo buenos valores de potencia y campo eléctrico en el sistema.

Otra solución presentada, busca la implementación del arreglo de antenas de tipo parche o *microstrip*. Orbaiceta (2017) muestra el diseño y caracterización de una agrupación o *array* de antenas parche en tecnología *microstrip* en polarización circular para operar a 8 GHz y con parámetros de un tamaño máximo de 76 mm, una ganancia entre 11 dBi y 14 dBi, un ancho de banda del 5% y una relación

axial menor a 4 dB. Concluye que el mayor problema que presentan las antenas tipo parche es el manejo del ancho de banda, el cual es bajo, ya que estas antenas tienen una naturaleza resonante.

Por su parte, Castrillón (2016), teniendo en cuenta el proceso de simulación de antenas microstrip, diseña una antena microstrip parche con geometría en anillo con variaciones en los parámetros que definen el comportamiento de esta, para observar cambios en sus características radiantes. Encuentra que el espesor de la antena está relacionado con la frecuencia de trabajo, si se requieren mayores frecuencias de trabajo, el espesor debe ser menor, según los parámetros adicionales que tenga el material o sustrato en el que vaya a ser fabricada la antena.

2.2.2.3. Tecnologías usadas para la fabricación de antenas microstrip.

Existe un amplio número de sustratos que pueden ser usados para el diseño de antenas *microstrip* y sus constantes dieléctricas están normalmente en el rango de $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Aquellos que son los más adecuados para el buen rendimiento de la antena, son los sustratos gruesos cuya constante dieléctrica está en la parte más baja del rango. Ellos proveen mejor eficiencia, mayor ancho de banda, con pocas pérdidas de radiación en el espacio, pero a expensas de un mayor tamaño del elemento.

Los sustratos delgados con mayores constantes dieléctricas son adecuados para los circuitos de microondas porque ellos requieren campos que minimicen la radiación no deseada y el acoplamiento, llevando a menores tamaños del elemento. Sin embargo, debido a sus mayores pérdidas, son menos eficientes y tiene relativamente menores anchos de banda. Debido a que las antenas *microstrip* están a menudo integradas con otros circuitos de microondas, se debe alcanzar un compromiso entre un buen rendimiento de la antena y un correcto diseño del circuito. (Balanis, 2005).

2. 3. Algoritmos de localización usados en arreglos de antenas.

2.3.1. Directividad de los haces.

Existen varios métodos de localización de una señal para determinar la posición de una emisión que llega a una antena, entre ellos:

- Método de diferencia de tiempo de llegada (TDoA).
- Método de ángulo de llegada (AoA).

- Método de potencia de llegada (PoA).
- Método de dirección de llegada (DoA).
- Método RSSI (received signal strength indicator).

2.3.1.1. Método de diferencia de tiempo de llegada (TDoA).

El método de diferencia de tiempo de llegada (TDoA) requiere, bien sea el uso de antenas direccionales rotativas o agrupaciones de antenas con configuraciones especiales y un proceso de calibración complejo. El TDoA se ha venido utilizando desde hace varios años en los sistemas móviles para localización de llamadas de emergencia.

Es una técnica basada en la trilateración que requiere de al menos tres nodos para que se realice una estimación de la posición del transmisor (*TN, transmisor node*) en dos dimensiones. A mayor número de nodos observadores o nodos de referencia (*RN, Reference node*) presentes en el sistema, existirá una mayor precisión en la estimación de la procedencia de la señal (Sánchez, 2016).

En TDoA es fundamental la sincronización en tiempo entre los nodos de referencia, ya que esta técnica mide las diferencias de tiempo de la señal que llega a cada uno de ellos. Esta sincronización de tiempo no es necesaria con el nodo objetivo.

2.3.1.2. Método de ángulo de llegada (AoA).

El método tradicional de ángulo de llegada (AoA) determina la localización del transmisor mediante la dirección de la propagación de una onda incidente de radio-frecuencia en un arreglo de antenas. Se basa en el principio de triangulación, estimando la dirección de llegada de una señal mediante la medición de ángulos. Cuando hay dos receptores que se encuentran separados uno del otro de manera que se perciba un ángulo de llegada diferente de la señal proveniente del transmisor es posible su localización mediante intercepción de los ángulos estimados por cada receptor. (Sánchez, 2016).

La precisión del sistema depende de la propagación de la señal y la distancia entre transmisor y receptor. La técnica de localización basada en AoA brinda resultados con bastante precisión para entornos de línea de vista, pero su rendimiento decae en entornos sin línea de vista. (Cruz, 2017).

2.3.1.3. Método de potencia de llegada (PoA).

La norma de sistemas dinámicos de monitoreo, UIT-R SM.2355, expedida por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT, o ITU por sus siglas en inglés) en 2015, especifica que el método de potencia de llegada (PoA), es un método económico para localizar un transmisor, porque no requiere de hardware de monitoreo adicional.

La potencia de una señal de radio puede ser estimada de acuerdo a los modelos de propagación con el conocimiento de la potencia del transmisor y el camino de propagación, lo cual es usado especialmente para sistemas de comunicación inalámbricos estándar. (ITU, 2015).

2.3.1.4. Método de dirección de llegada (DoA).

La dirección de llegada es un método de detección usado en sistemas de antenas inteligentes en donde se busca conocer las señales de interés para lograr maximizar la captación de potencia, mejorar la relación señal a ruido, mitigar interferencias y aumentar la eficiencia espectral. Las características del arreglo de antenas, tales como su geometría y correspondiente arreglo diferencial, tienen efectos en aspectos como el fenómeno del acoplamiento mutuo, la precisión del estimador de DoA y la resolución espacial del arreglo.

Las características más importantes para tener en cuenta en la estimación DoA son: la precisión, el acoplamiento mutuo entre sensores y el número de equipos de usuarios (UE) que puedan ser estimados en relación con el número de antenas en el arreglo. El principal objetivo es minimizar el acoplamiento mutuo entre las antenas del arreglo, procurando hacer más compacto la estructura de este, y lograr mejores precisiones y la posibilidad de estimar más equipos terminales usando el mismo número de antenas en el arreglo. Se busca minimizar significativamente el número de sensores en el arreglo, dando poco espacio entre ellos, minimizando de esta manera el acoplamiento mutuo.

Un alto acoplamiento mutuo ocasiona un mal funcionamiento en el sistema de antenas inteligentes evidente en errores en el cálculo de la dirección de llegada de las señales, degradación en la estimación del canal, problemas en la supresión de interferencias mediante la formación de haces. Por otro lado, se abre la necesidad de explorar la geometría de antenas para mejorar características como la resolución espacial para atender más equipos de recepción con el mínimo número de antenas en el arreglo transmisor.

La estimación de la dirección de llegada (DoA) basada en la RSS (*received signal strength*), es analizada por Kulas (2018) usando un algoritmo que emplea los valores de la RSS dentro de una red inalámbrica de sensores (WSN, *Wireless sensor network*) para estimar la dirección de llegada de la señal. Usa un arreglo de antenas con elementos parásitos electrónicamente dirigidos (ESPAR), realizando mediciones para varios puntos e interpolando patrones de radiación. Adicionalmente, encuentra que es posible estimar la dirección de una señal usando 30 puntos para calibración, a diferencia de los 360 puntos que se necesitan en la calibración cuando no hay ninguna interpolación en el patrón de radiación. Esto reduce el tiempo de calibración y la estimación de la dirección de llegada a la antena se hace más eficiente y precisa.

2.3.1.5. Método RSSI (received signal strength indicator).

El RSSI es una técnica de detección de fuerza de señal recibida que mide la potencia presente en una señal y puede ser usado para determinar la localización de una transmisión de manera eficiente y económica, siendo un indicador de los niveles de potencia que son recibidos por el receptor, por eso, a mayor RSSI, mayor fuerza en la señal. De esta manera, en un arreglo de antenas que haga uso de este método de detección, se busca ver el RSSI de cada elemento y de esta manera conmutar para el elemento que mayor nivel esté recibiendo.

RSSI y PoA se basan en los niveles de potencia recibidos y a pesar de ser similares poseen diferencias importantes. En PoA se asume que ya se conoce la potencia transmisora y el trayecto de propagación. En RSSI este tipo de información no se tiene disponible, solo se trabaja con el nivel de potencia recibido y las diferencias que puedan ser establecidas entre los sensores. (Cruz, 2017).

La técnica de detección RSSI se utiliza comúnmente en sistemas de comunicación inalámbrica para determinar la intensidad de la señal recibida. La técnica consiste en medir la potencia de la señal recibida en un receptor y compararla con una potencia de referencia. Esta comparación se realiza mediante un cálculo matemático que produce una medida de la intensidad de la señal recibida en términos de dBm o V. La detección de RSSI es útil en aplicaciones de seguimiento y localización en interiores, donde la señal GPS no es efectiva. La precisión de la técnica depende de varios factores, como la distancia entre los dispositivos, la presencia de obstáculos y el ruido en el canal de comunicación. Además, los valores RSSI pueden variar según el modelo del dispositivo y el entorno en el que se encuentra. A pesar de estas limitaciones, la técnica de detección RSSI es una herramienta

valiosa en la optimización de redes inalámbricas y en la mejora de la eficiencia en la transmisión de datos.

La detección de señal mediante RSSI con antenas es una técnica comúnmente utilizada en sistemas de comunicación inalámbrica. Las antenas son responsables de capturar las ondas de radio entrantes y convertirlas en señales eléctricas, que pueden medirse con la técnica de detección RSSI. La eficacia de la antena en la detección de señales RSSI depende de varios factores, como la ganancia de la antena, el patrón de radiación, la polarización y el entorno en el que se encuentra.

En general, las antenas con una ganancia más alta y un patrón de radiación direccional son mejores para capturar señales débiles y reducir la interferencia de otras fuentes. La detección de señal mediante RSSI con antenas se utiliza en una variedad de aplicaciones, como sistemas de seguimiento de activos, redes de sensores inalámbricos y sistemas de posicionamiento en interiores. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la precisión de la medición RSSI depende de la calidad de la señal recibida, y factores como la interferencia multitrayectoria, la atenuación y el ruido pueden afectar la fiabilidad de la medición. Por lo tanto, la selección y ubicación cuidadosa de la antena son cruciales para garantizar una detección de señal RSSI fiable y precisa en sistemas de comunicación inalámbrica.

La calidad de detección de sistemas RSSI para microondas puede variar según varios factores, como la frecuencia de operación, la potencia de transmisión, la sensibilidad del receptor y la calidad de la antena. En general, los sistemas RSSI pueden proporcionar una medida razonablemente precisa de la intensidad de la señal recibida en sistemas de microondas.

2.3.2. Modelo de propagación en el espacio libre.

Se utiliza para la predicción de la potencia de la señal cuando se presenta una clara línea de vista entre el transmisor y el receptor. Es usado en varios sistemas, siendo los sistemas de comunicaciones satelitales, los enlaces de microondas y los sistemas de comunicaciones que usan bandas de frecuencia altas algunos ejemplos que usan este modelo de propagación. Este modelo predice que la potencia recibida decae como función de la distancia (d) que separa al transmisor y al receptor elevada a alguna potencia. La potencia de recepción que reciben en el espacio libre una antena receptora separada una distancia d de la antena transmisora está dada por (2):

$$P_R(d) = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (2)$$

Donde,

P_T es la potencia transmitida por la antena transmisora del sistema.

P_R es la potencia recibida por la antena receptora del sistema, función de la separación entre transmisor y receptor (Tx y Rx).

G_T es la ganancia de la antena transmisora del sistema.

G_R es la ganancia de la antena receptora del sistema.

d es la distancia de separación entre transmisor y receptor en metros.

L es el factor de pérdidas del sistema que no están relacionadas con la propagación.

λ es la longitud de onda presentada en metros.

La ganancia de las antenas está dada por (3):

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (3)$$

La apertura efectiva A_e está relacionada con el tamaño físico de la antena y λ está relacionada con la frecuencia de la portadora, mediante la ecuación $\lambda = \frac{c}{f}$, donde c es la velocidad de la luz expresada en metros/segundo y f es la frecuencia de la portadora expresada en Hercios.

Los valores de las potencias P_T y P_R son expresados en las mismas unidades.

Las ganancias G_T y G_R son cantidades adimensionales.

Finalmente, las pérdidas L son ocasionadas por la atenuación de la línea de transmisión, pérdidas por filtros o pérdidas de la antena en los sistemas de comunicaciones. Cuando este valor L es igual a 1, implica que no hay pérdidas en el sistema.

Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se muestra la metodología que se siguió para el desarrollo del trabajo de grado: el diseño y simulaciones realizadas para comprobar el funcionamiento de un sistema de comunicación entre dron y estación terrena fija en la banda de 3.5 GHz por medio de las antenas requeridas y caracterizar los parámetros de las antenas inteligentes. La metodología para el desarrollo del trabajo de grado es cuantitativa, de naturaleza exploratoria y descriptiva, ya que estos planteamientos cuantitativos son útiles para evaluar, comparar, establecer precedentes y determinar causalidad y sus implicaciones. (Hernández Sampieri, 2014). Esta metodología cuantitativa busca la confirmación de un diseño un arreglo de antenas inteligentes de tipo *microstrip* de haz conmutado ubicadas en el dron y la implementación para comprobar el funcionamiento adecuado de comunicación con la estación terrena fija por un enlace de microondas.

Inicialmente se realiza el diseño de las antenas *microstrip* individuales en un sustrato adecuado de la marca Taconic, mediante MATLAB y CST Studio. Posteriormente, se realiza el diseño de los arreglos de antenas inteligentes de 4 y 6 elementos con las mismas herramientas de simulación, de manera que se conozca su comportamiento, en especial sus patrones de radiación y ganancias.

En el plan operativo diseñado para el inicio del proyecto, se configura un diseño metodológico que consta de cuatro etapas que se muestran en la Figura 23 y que se describen a continuación:

La primera etapa que corresponde a la revisión bibliográfica y del estado del arte sobre arreglos de antenas, características de los arreglos y configuraciones, sensores RSSI, algoritmos para conmutación de antenas y un estudio del software de simulación y fabricación a utilizar. Los resultados de esta etapa se encuentran en el capítulo 2 de este documento y en el anexo de equipos y herramientas usadas. Esta revisión permitió escoger el tipo de arreglo y seleccionar el método de detección más adecuado para el sistema de comunicaciones.

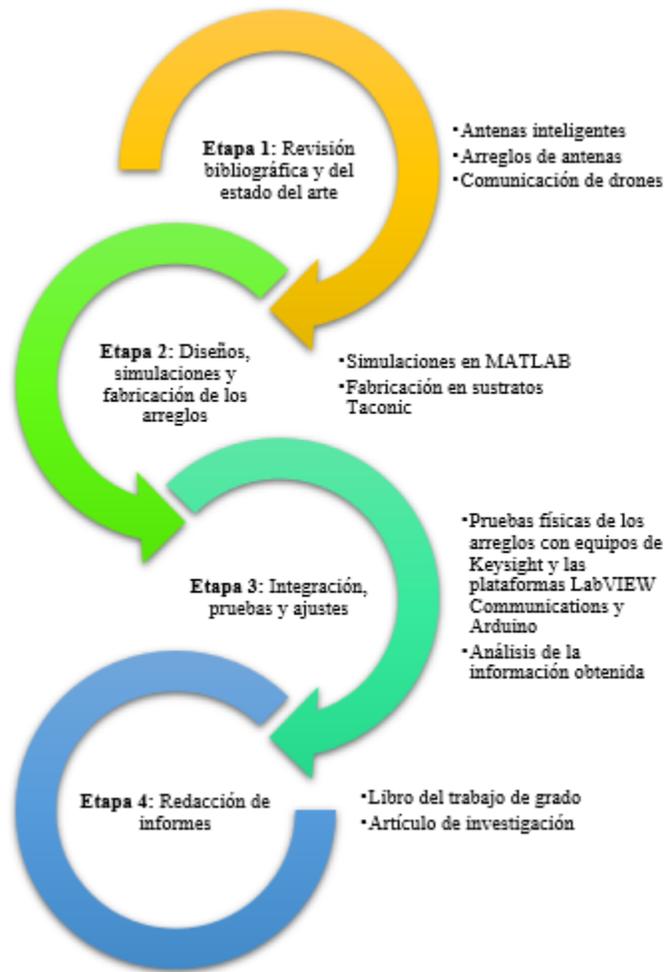


Figura 23. Metodología del proyecto.

Para atacar el problema de esta investigación, en el que se busca la realización y desarrollo de un sistema de comunicación entre un dron y una estación terrena fija, se inicia con la realización de la antena de estación fija, su diseño teórico, simulación, ajustes y, finalmente, su construcción; posteriormente, se pasa al arreglo de antenas, cuyos elementos son idénticos a la antena de la estación terrena, por lo que se realiza el diseño, simulación, ajustes y la construcción de los arreglos. Se desarrolla el algoritmo de conmutación con su programación respectiva en la placa Arduino, luego se hace la integración del sistema, las pruebas de laboratorio y los ajustes que sean necesarios para encontrar el sistema final.

Se hace uso de la frecuencia central de 3,5 GHz, situada dentro de la banda de 3,4 a 3,6 GHz. Esta banda se denomina banda 22 para FDD (DL 3410-3490, UL 3510-3590) y en TDD es denominada como banda 42 o 43. En cuanto a la disponibilidad de la frecuencia de 3,5 GHz para uso público en Colombia, de acuerdo a las regulaciones y políticas emitidas por la autoridad de telecomunicaciones de Colombia, como la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC) y el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) se verificó que la banda de frecuencia de 3,4 GHz a 3,6 GHz está asignada para servicios de telecomunicaciones y está disponible para uso público en Colombia, sujeto a las condiciones y requisitos establecidos por las autoridades. En cuanto al uso actual de esta banda de frecuencia en Colombia, aunque algunas partes de la banda estén asignadas para servicios específicos, como la comunicación móvil, los servicios fijos por satélite y radioaficionados, hay suficiente disponibilidad en la mayoría de las regiones para aplicaciones de drones y esta frecuencia está disponible para uso público cumpliendo con los requisitos establecidos por las autoridades de telecomunicaciones del país.

La segunda etapa correspondiente a los diseños, simulaciones y fabricación del arreglo de antenas en los sustratos más adecuados para la configuración del enlace de microondas, junto a la antena para la transmisión desde el USRP mediante el uso de las plataformas MATLAB y CST Studio, se trata en la siguiente sección:

3.1. Diseño de una antena *microstrip* rectangular a 3500 MHz.

Para la transmisión de la señal a los arreglos, se conecta al USRP-2954R una antena *microstrip* que funciona a una frecuencia de 3500 MHz. Los parámetros y cálculos necesarios para realizar este diseño se muestran a continuación:

- Sustrato utilizado: **Taconic TLY-5**

Constante dieléctrica: $\epsilon_r = 2,2$

Altura del sustrato: $h = 1,52 \text{ mm} = 0,152 \text{ cm} = 0,00152 \text{ m}$

Frecuencia de trabajo: $f_r = 3,5 \text{ GHz} = 3,5 * 10^9 \text{ Hz}$

1. Para hallar el ancho (W) del parche, se usa (4):

$$W = \frac{1}{2(f_r)(\sqrt{\mu_0 \epsilon_0})} \left(\sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \right) = \frac{v_0}{2(f_r)} \left(\sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \right) \quad (4)$$

Donde v_0 es la velocidad de la luz = $3 * 10^8 \frac{m}{s}$

Así, sustituyendo en (4),

$$W = \frac{v_0}{2(f_r)} \left(\sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \right) = \frac{3 * 10^8 m/s}{2(3,5 * 10^9 Hz)} \left(\sqrt{\frac{2}{2,2 + 1}} \right) = 0,0338815 m = \mathbf{3,38815 cm}$$

2. Para hallar la constante dieléctrica efectiva (ϵ_{reff}), se usa (5):

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{2,2 + 1}{2} + \frac{2,2 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{(0,152 cm)}{(3,38815 cm)} \right]^{-\frac{1}{2}} = 2,08375$$

3. Para hallar la longitud incremental extendida del parche (ΔL), se aplica (6):

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (6)$$

$$\Delta L = (0,412)(0,152 cm) \frac{(2,08375 + 0,3) \left(\frac{3,38815}{0,152} + 0,264 \right)}{(2,08375 - 0,258) \left(\frac{3,38815}{0,152} + 0,8 \right)} = 0,079865 cm$$

4. Longitud real L del parche, mediante (7):

$$L = \frac{v_0}{2(f_r)(\sqrt{\varepsilon_{eff}})} - 2\Delta L = \frac{3 * 10^8 \frac{m}{s}}{2(3,5 * 10^9 \text{ Hz})(\sqrt{2,08375})} - 2(0,079865 * 10^{-2}) = \quad (7)$$

$$L = 0,028092 \text{ m} = \mathbf{2,8092 \text{ cm}}$$

5. Finalmente, la longitud efectiva L_{eff} se halla con (8):

$$L_{eff} = L + 2\Delta L = 2,8092 + 2(0,079865) = 2,9689 \text{ cm} \quad (8)$$

De esta manera, el ancho W del parche requerido es de 3,3881 cm y la longitud L es de 2,8092 cm, para su fabricación en el sustrato Taconic TLY-5, como se muestra en la Figura 24.

Se eligió un sistema de alimentación de sonda coaxial, donde se usa un conector SMA hembra soldado directamente al plano de tierra del sustrato. Para la ubicación de este punto de alimentación en el parche se usa (9) y (10).

$$\lambda = \frac{v_0}{f} = \frac{(3 * 10^8 \frac{m}{s})}{(3,5 * 10^9 \text{ Hz})} = 0,0857 \text{ m} = 8,57 \text{ cm} \quad (9)$$

$$k = \frac{2\pi f}{v_0} = \frac{2\pi}{\lambda} = 73,304 \text{ m}^{-1} \quad (10)$$

Como en este caso $W \geq L$, entonces se hace uso de (11) y (12):

$$y_0 = \frac{W}{2} = \frac{0,0338815 \text{ m}}{2} = 0,016941 \text{ m} = \mathbf{1,7 \text{ cm}} \quad (11)$$

$$x_0 = \frac{L}{2\sqrt{\varepsilon_{eff}}} = \frac{0,028092 \text{ m}}{2\sqrt{2,08375}} = 0,009731 \text{ m} = \mathbf{1 \text{ cm}} \quad (12)$$

De esta manera, el punto de alimentación en el parche se encuentra a 1,7 cm sobre el eje y del parche, que corresponde a W en la Figura 24, y a 1 cm sobre el eje x del parche, que corresponde a L en la

misma figura: allí va soldado el conector SMA hembra que cuenta con una impedancia nominal de 50Ω .

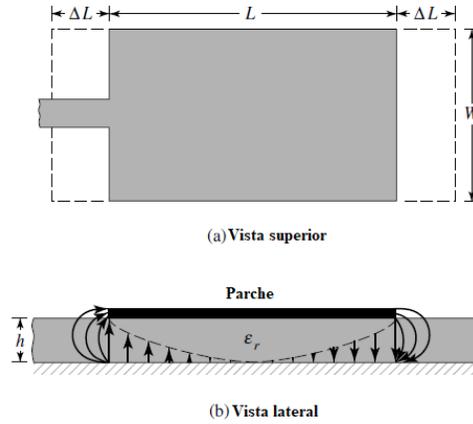


Figura 24. Dimensiones y longitudes físicas y efectivas de un parche rectangular en tecnología de microcinta. (Balanis, 2005).

Para la caracterización de esta antena en el sustrato TLY-5, se tienen en cuenta las expresiones de campo eléctrico E y magnético H , dadas por (13) y (14) respectivamente:

$$\vec{E} = E_0 \cos \frac{\pi \left(y + \frac{b}{2} \right)}{b} \vec{z} \quad (13)$$

$$\vec{H} = H_0 \operatorname{sen} \frac{\pi \left(y + \frac{b}{2} \right)}{b} \vec{x} \quad (14)$$

A partir de estas fórmulas se halla la potencia radiada de la siguiente manera expresada en (15):

$$P_{rad} = \oiint \vec{S} \cdot d\vec{s} \quad (15)$$

Donde, se tiene que de acuerdo a (16) y (17):

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\vec{E} \times \vec{H}) \quad (16)$$

$$\vec{S} = \frac{E_0 H_0}{2} \cos\left(\frac{\pi\left(y + \frac{b}{2}\right)}{b}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi\left(y + \frac{b}{2}\right)}{b}\right) \vec{y} \quad (17)$$

$$\vec{ds} = dz dx \vec{y}$$

Por lo que al reemplazar en (16) se obtiene (18):

$$P_{rad} = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_0^h \frac{E_0 H_0}{2} \cos\left(\frac{\pi\left(y + \frac{b}{2}\right)}{b}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi\left(y + \frac{b}{2}\right)}{b}\right) \vec{y} \cdot dz dx \vec{y} \quad (18)$$

Finalmente, la potencia radiada por la antena microstrip queda determinada por la expresión en (19):

$$P_{rad} = \frac{E_0 H_0 a h}{2} \cos\left(\frac{\pi\left(y + \frac{b}{2}\right)}{b}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi\left(y + \frac{b}{2}\right)}{b}\right) [W]$$

$$P_{rad} = \frac{E_0 H_0 (0,152)(3,38815)}{2} \cos\left(\frac{\pi\left(y + \frac{2,8092}{2}\right)}{2,8092}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi\left(y + \frac{2,8092}{2}\right)}{2,8092}\right) [W]$$

$$P_{rad} = \frac{0,5149 E_0 H_0}{2} \cos\left(\frac{\pi(y + 1,4046)}{2,8092}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi(y + 1,4046)}{2,8092}\right) [W] \quad (19)$$

Posteriormente, se hallan los valores de directividad de las antenas según (20):

$$D_0 = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (20)$$

Donde,

$$U_{max} = \text{Intensidad de radiación} = \frac{|V_0|^2}{2\eta_0 \pi^2} \left(\frac{\pi W}{\lambda_0}\right)^2$$

Así, la directividad de las antenas microstrip está dada por la expresión (21):

$$D_0 = \frac{4\pi \frac{|V_0|^2}{2\eta_0 \pi^2} \left(\frac{\pi W}{\lambda_0}\right)^2}{\frac{E_0 H_0 a h}{2} \cos\left(\frac{\pi\left(y + \frac{b}{2}\right)}{b}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi\left(y + \frac{b}{2}\right)}{b}\right)}$$

$$D_0 = \frac{4\pi \frac{|V_0|^2}{2\eta_0\pi^2} \left(\frac{\pi W}{8,571}\right)^2}{\frac{0,5149 E_0 H_0}{2} \cos\left(\frac{\pi(y + 1,4046)}{2,8092}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi(y + 1,4046)}{2,8092}\right)} = \mathbf{6,125 \text{ dB}} \quad (21)$$

La ganancia de la antena microstrip en unidades logarítmicas está dada por (22):

$$G = 10^{\frac{5 \text{ dBi}}{10}} = 3,1623 \text{ dBi} \quad (22)$$

Con esto, se puede hallar el área efectiva de la antena, que corresponde a la eficiencia de radiación de la antena de acuerdo a (23):

$$A_E = \frac{G(\lambda^2)}{4\pi} = \frac{(3,1623 \text{ dBi})(0,0857 \text{ m})^2}{4\pi} = 0,002242 \text{ m}^2 \quad (23)$$

El ancho de haz de la antena corresponde a (24):

$$\Omega_A = \frac{4\pi}{D_0} \quad (24)$$

Reemplazando (21) en (24) se obtiene (25):

$$\Omega_A = \frac{\frac{4\pi}{1}}{\frac{4\pi \frac{|V_0|^2}{2\eta_0\pi^2} \left(\frac{\pi W}{\lambda_0}\right)^2}{\frac{E_0 H_0 a h}{2} \cos\left(\frac{\pi\left(y + \frac{b}{2}\right)}{b}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi\left(y + \frac{b}{2}\right)}{b}\right)}} \quad (25)$$

Finalmente, el ancho de haz corresponde a (26):

$$\Omega_A = \frac{\frac{E_0 H_0 a h}{2} \cos\left(\frac{\pi\left(y + \frac{b}{2}\right)}{b}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi\left(y + \frac{b}{2}\right)}{b}\right)}{\frac{|V_0|^2}{2\eta_0\pi^2} \left(\frac{\pi W}{\lambda_0}\right)^2}$$

$$\Omega_A = \frac{0,5149 E_0 H_0 \cos\left(\frac{\pi(y + 1,4046)}{2,8092}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi(y + 1,4046)}{2,8092}\right)}{\frac{|V_0|^2}{2\eta_0\pi^2} \left(\frac{\pi W}{8,571}\right)^2} = 2,05 \text{ sr} \quad (26)$$

La resistencia de radiación de la antena microstrip está dada por (27):

$$R_{rad} = \frac{Q_r(2h)}{2\pi f(\epsilon_0)(\epsilon_{reff})(ab)} \quad (27)$$

Donde,

$$Q_r = \frac{(c)(\sqrt{\epsilon_{reff}})}{(4h)(f)} = \frac{(3 * 10^8 \frac{m}{s})(\sqrt{2,08375})}{(4)(0,0338815)(3,5 * 10^9 \text{ Hz})} = 0,91296 \quad (28)$$

$\epsilon_{reff} = \text{constante dieléctrica efectiva}$

$$\epsilon_{reff} = \frac{2,2 + 1}{2} + \frac{2,2 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{(0,152 \text{ cm})}{(3,38815 \text{ cm})} \right]^{-\frac{1}{2}} = 2,08375 \quad (29)$$

De esta manera, reemplazando (28) y (29) en (27), se obtiene:

$$R_{rad} = \frac{(0,91296)(2)(3,38815)}{2\pi(3,5 * 10^9 \text{ Hz})(8,854 * 10^{-12})(2,08375)(0,152)(2,8092)} = 63,7096 \Omega$$

La relación de onda estacionaria ROE o VSWR por sus siglas en inglés, está representada por (30):

$$VSWR = \frac{70}{50} = 1,4 \quad (30)$$

El coeficiente de reflexión de la antena, correspondiente al voltaje reflejado sobre el voltaje incidente en la misma, está dado por (31):

$$\Gamma = \frac{20}{130} = 0,16 \quad (31)$$

El ancho de banda BW de la antena viene dado por (32):

$$BW = \frac{f}{Q} \quad (32)$$

Donde f es la frecuencia de resonancia de la antena y Q es el factor de calidad de la antena microstrip, cuyo valor típico en este tipo de antena es 100, de esta manera, el ancho de banda queda definido por (33):

$$BW = \frac{3,5 * 10^9 \text{ Hz}}{100} = \frac{f}{Q} = \mathbf{35 \text{ MHz}} \quad (33)$$

- **Simulación de la antena *microstrip* individual para la estación terrena en TLY-5.**

Al realizar la simulación de la antena individual en el sustrato TLY-5 en el software MATLAB R2019a, con el *Antenna Toolbox* integrado y el *Antenna Designer*, se obtienen los siguientes resultados, iniciando con la visualización de la antena y sus componentes, que se observa en la Figura 25.

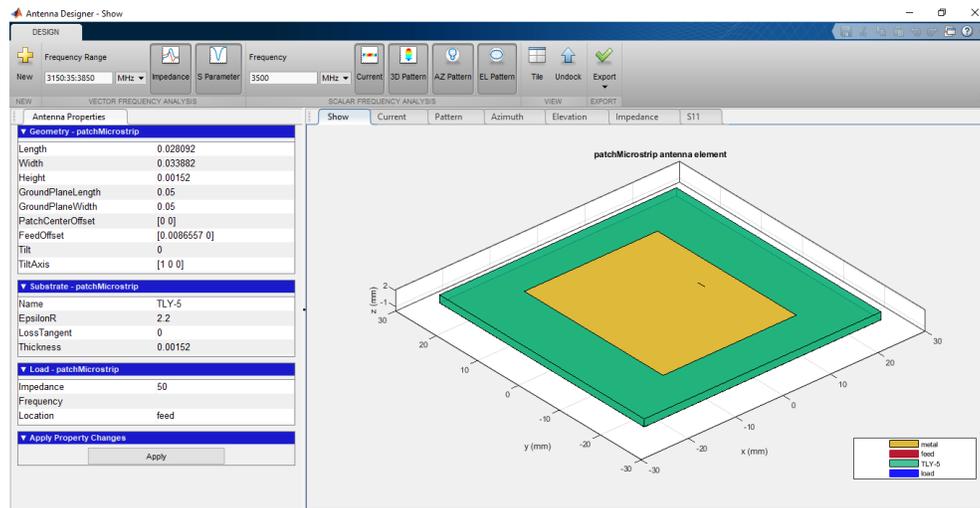


Figura 25. Visualización de la antena *microstrip* en TLY-5 en MATLAB.

Posteriormente, se simula el patrón de radiación, que muestra valor de directividad máxima es de 7,6 dB, lo que puede ser observado en 3D en la Figura 26.

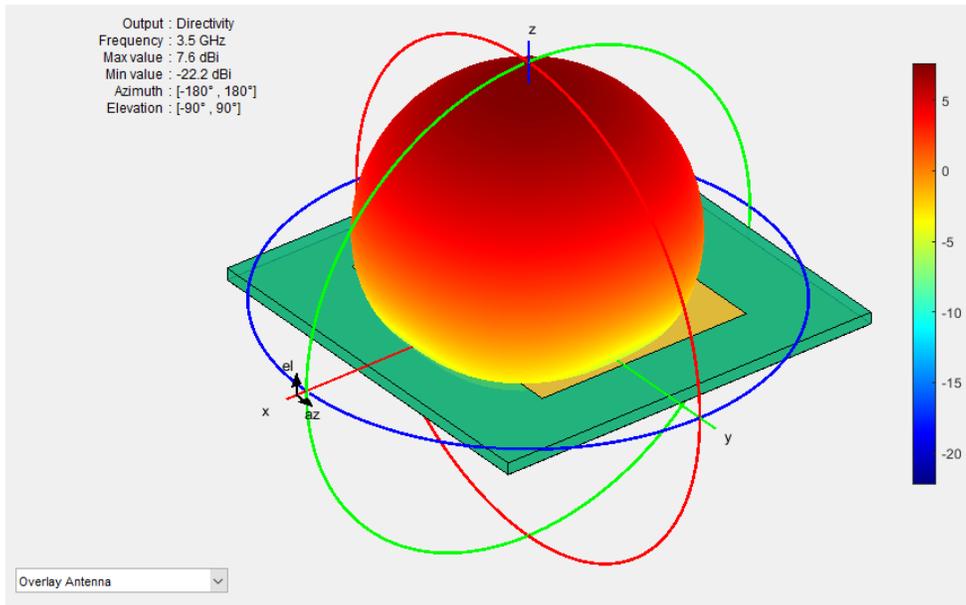


Figura 26. Patrón de radiación de la antena *microstrip* en TLX-5.

La Figura 27 muestra el patrón de elevación de la antena, que corresponde al barrido del ángulo de elevación (θ) que sale del eje z y avanza hacia el plano xy , para su valor de frecuencia de trabajo de 3500 MHz.

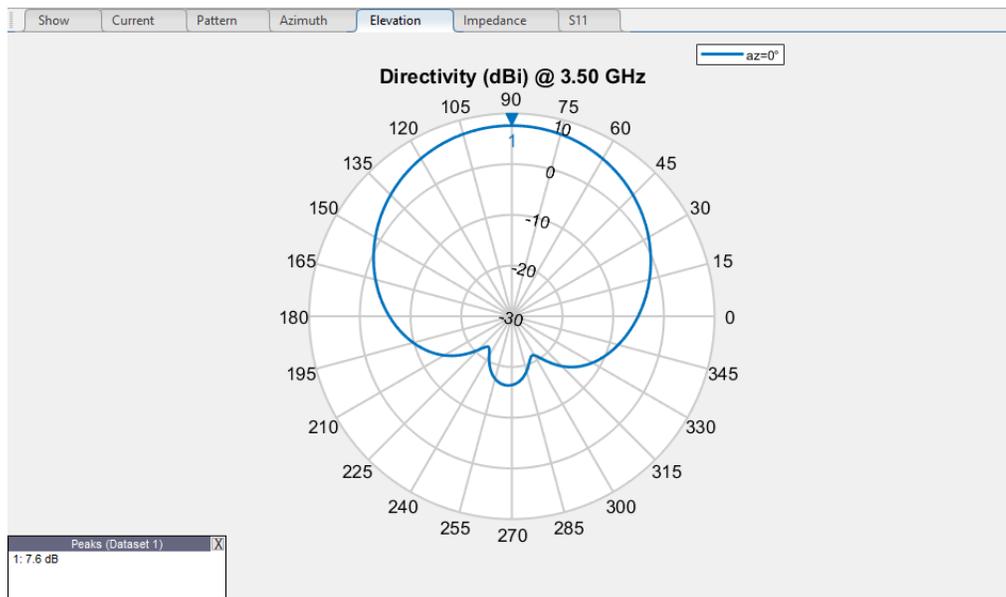


Figura 27. Elevación de la antena *microstrip* en TLX-5 a 3500 MHz.

Los valores de Impedancia, con sus componentes reales de resistencia (70Ω) e imaginarios de reactancia (-25Ω), ambos componentes presentes para una frecuencia de resonancia de 3,5 GHz, de la antena *microstrip* se muestran en la Figura 28.

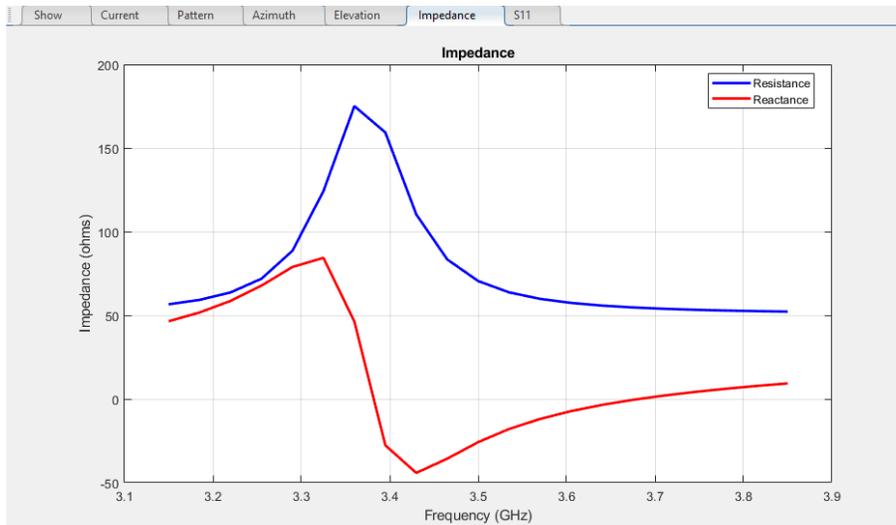


Figura 28. Impedancia de la antena *microstrip* en TLY-5.

El parámetro de dispersión de la antena, también denominado “Parámetro S11” que es equivalente al coeficiente de reflexión para la antena, se observa en la Figura 29, que corresponde a un valor de -11 dB para una frecuencia de trabajo de 3,5 GHz. Este valor es equivalente a una pérdida de retorno (*return loss*) de 11 dB.

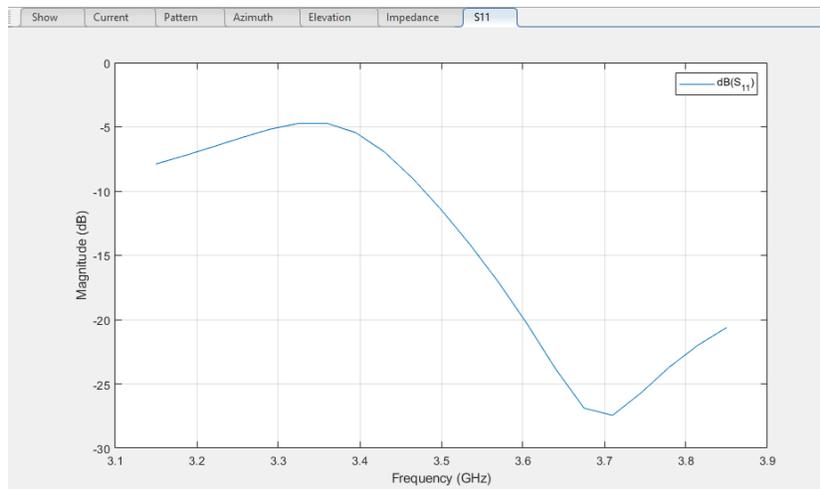


Figura 29. Parámetro de dispersión S11 de la antena *microstrip* en TLY-5.

Finalmente, en la Figura 30 se contempla el valor de relación de onda estacionaria (VSWR) para la antena en una frecuencia de resonancia de 3,5 GHz, correspondiente a un nivel de 1,02 y obtenido en la simulación de CST Studio. Tanto el VSWR como la magnitud del parámetro S11 presentan un mínimo en la misma frecuencia, dado que ambos son indicadores de la potencia reflejada en la antena.

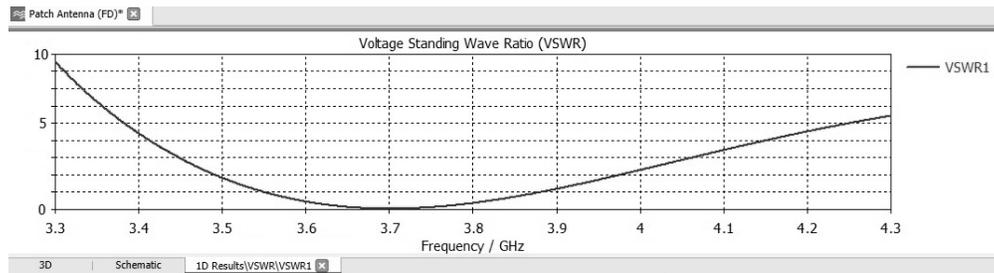


Figura 30. Relación de onda estacionaria (VSWR) simulada en CST Studio.

3.2. Diseño de arreglos de antenas *microstrip* a 3500 MHz.

Se procede a realizar el diseño y simulación de los arreglos de antenas de 4 y 6 elementos propuestos en las hipótesis de trabajo, de manera que se pueda evaluar su comportamiento. Estas simulaciones son realizadas también en MATLAB R2019a, con el *Antenna Toolbox* integrado y con SystemVue de Keysight.

En el diseño de cualquier sistema de arreglo de antenas, los parámetros de diseño más importantes son usualmente: el número de elementos, el espaciado entre los elementos, la excitación (amplitud y fase), el ancho de haz de potencia media o potencia mitad, la directividad y el nivel de los lóbulos laterales. En un procedimiento de diseño algunos de esos parámetros son específicos y otros deben ser determinados, dependiendo del tipo de arreglo necesario.

Cada antena del arreglo, que en este caso tiene los elementos dispuestos sobre el plano horizontal, es un parche rectangular con las mismas dimensiones de las antenas individuales *microstrip* ubicadas en un sustrato con permitividad relativa de 2,2 (TLY-5), un grosor de 0,152 cm (TLY-5) y una tangente de pérdidas de 0,001. De esta manera, la distancia de separación entre los elementos del arreglo es $L = \lambda/4$, con un valor de $\lambda = 0,085714 \text{ m} = 8,5714 \text{ cm}$, por lo que $L = 8,5714/4 = 2,14285 \text{ cm}$ es la distancia entre elementos.

Para la caracterización de los arreglos de antenas se tiene en cuenta que los valores de potencia radiada, directividad, ancho de haz y resistencia de radiación son los mismos que para una antena microstrip individual, con su multiplicación por el factor del arreglo, también conocido como AF o FA.

En general, los arreglos de antenas pueden mejorar la ganancia y la directividad en comparación con una única antena, y la directividad del arreglo aumenta con el número de elementos en el arreglo. Sin embargo, la directividad también puede verse afectada por otros factores, como la calidad de la señal de entrada

El diagrama de radiación normalizado de una agrupación de n antenas no isotrópicas (principio de multiplicación de patrones) está dado por (34):

$$E_k(\theta, \phi)_n = \sum_{k=1}^n a_k f_k(\theta, \phi) e^{j\psi_k} \quad (34)$$

Con $\psi_k = k \cos \phi + \delta_k$ y δ_k es la fase de a_k .

Debido a que todas las antenas de la agrupación son iguales, con idéntico diagrama de radiación $f_k(\theta, \phi)$, (34) queda como (35):

$$E_k(\theta, \phi)_n = f_k(\theta, \phi) \sum_{k=1}^n a_k e^{j\psi_k} = E_N(\theta, \phi) f_k(\theta, \phi) \quad (35)$$

Para un arreglo circular, el factor del arreglo se expresa como aparece en (36):

$$(AF)_n(\theta, \phi) = \left\{ \frac{1 \operatorname{sen}\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{M \operatorname{sen}\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right\} \left\{ \frac{1 \operatorname{sen}\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{N \operatorname{sen}\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right\} \quad (36)$$

El campo eléctrico total del arreglo corresponde a (37):

$$E_k(\theta, \phi)_n = E_N(\theta, \phi) AF_n(\theta, \phi) \quad (37)$$

Donde E_N es el campo individual normalizado de un elemento del arreglo, y corresponde a (38):

$$\vec{E}_N = \cos \frac{\pi \left(y + \frac{b}{2}\right)}{b} \vec{z} = \cos \left(\frac{\pi(y + 1,4046)}{2,8092} \right) \quad (38)$$

Así, reemplazando (36) y (38) en (37), el campo total del arreglo corresponde a (39):

$$E_k(\theta, \phi)_n = \cos\left(\frac{\pi(y + 1,4046)}{2,8092}\right) \left\{ \frac{1}{M} \frac{\text{sen}\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\text{sen}\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right\} \left\{ \frac{1}{N} \frac{\text{sen}\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\text{sen}\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right\} \quad (39)$$

La potencia radiada por el arreglo, se expresa como (40):

$$P_{rad} = \oiint \vec{S} \cdot \vec{ds} \quad (40)$$

Donde,

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}) \quad (41)$$

Reemplazando (41) en (40), se obtiene (42):

$$\vec{S} = \frac{E_0 H_0 a h}{2} \cos\left(\frac{\pi(y + \frac{b}{2})}{b}\right) \left\{ \frac{1}{M} \frac{\text{sen}\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\text{sen}\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right\} \left\{ \frac{1}{N} \frac{\text{sen}\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\text{sen}\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right\} \text{sen}\left(\frac{\pi(y + \frac{b}{2})}{b}\right) \left\{ \frac{1}{M} \frac{\text{sen}\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\text{sen}\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right\} \left\{ \frac{1}{N} \frac{\text{sen}\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\text{sen}\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right\} \vec{y} \quad (42)$$

$$\vec{ds} = dz dx \vec{y}$$

Así, la potencia radiada se expresa como (43):

$$P_{rad} = 0,1262 \cos\left(\frac{\pi(y + 1,3877)}{2,7754}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi(y + 1,3877)}{2,7754}\right) * \left\{ \frac{1}{4} \frac{\text{sen}(2\psi_x)}{\text{sen}\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right\} \left\{ \frac{1}{4} \frac{\text{sen}(2\psi_y)}{\text{sen}\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right\}^2 [W] \quad (43)$$

El ancho de haz correspondiente al arreglo circular se expresa como (44) y (45):

$$\Omega_A = AF \frac{\theta_{y_0} \theta_{x_0} \text{sen}^2 \theta_0}{\sqrt{\left[\text{sen}^2 \phi_0 + \frac{\theta_{x_0}^2}{\theta_{y_0}^2} \cos^2 \phi_0 \right]} \sqrt{\left[\text{sen}^2 \phi_0 + \frac{\theta_{y_0}^2}{\theta_{x_0}^2} \cos^2 \phi_0 \right]}} = 1,289, \text{ para el arreglo de 4 elementos} \quad (44)$$

$$\Omega_A = AF \frac{\theta_{y_0} \theta_{x_0} \text{sen}^2 \theta_0}{\sqrt{\left[\text{sen}^2 \phi_0 + \frac{\theta_{x_0}^2}{\theta_{y_0}^2} \cos^2 \phi_0 \right]} \sqrt{\left[\text{sen}^2 \phi_0 + \frac{\theta_{y_0}^2}{\theta_{x_0}^2} \cos^2 \phi_0 \right]}} = 1,087, \text{ para el arreglo de 6 elementos} \quad (45)$$

Finalmente, la directividad del arreglo circular de n elementos dispuestos en el plano se expresa como (46):

$$D_0 = AF \frac{\pi}{\Omega_A(\text{rad}^2)} \quad (46)$$

Con lo que reemplazando (44) y (45) en (46), la directividad es equivalente a (47) y para cada arreglo se representa como (48) y (49):

$$D_0 = AF \frac{\pi}{\theta_{y_0} \theta_{x_0} \text{sen}^2 \theta_0} \quad (47)$$

$$D_0 = AF \frac{\pi \sqrt{\left[\text{sen}^2 \phi_0 + \frac{\theta_{x_0}^2}{\theta_{y_0}^2} \cos^2 \phi_0 \right]} \sqrt{\left[\text{sen}^2 \phi_0 + \frac{\theta_{y_0}^2}{\theta_{x_0}^2} \cos^2 \phi_0 \right]}}{\theta_{y_0} \theta_{x_0} \text{sen}^2 \theta_0} = \mathbf{9.750 \text{ dB}}, \text{ para el arreglo de 4 elementos} \quad (48)$$

$$D_0 = AF \frac{\pi \sqrt{\left[\text{sen}^2 \phi_0 + \frac{\theta_{x_0}^2}{\theta_{y_0}^2} \cos^2 \phi_0 \right]} \sqrt{\left[\text{sen}^2 \phi_0 + \frac{\theta_{y_0}^2}{\theta_{x_0}^2} \cos^2 \phi_0 \right]}}{\theta_{y_0} \theta_{x_0} \text{sen}^2 \theta_0} = \mathbf{11,558 \text{ dB}}, \text{ para el arreglo de 6 elementos} \quad (49)$$

La ganancia total del arreglo de antenas en la dirección de máxima radiación en términos lineales está dada por (50) y (51):

$$G = 4 * 10^{\frac{5 \text{ dBi}}{10}} = 12,649 \text{ dBi}, \text{ para el arreglo de 4 elementos.} \quad (50)$$

$$G = 6 * 10^{\frac{5 \text{ dBi}}{10}} = 18,974 \text{ dBi}, \text{ para el arreglo de 6 elementos.} \quad (51)$$

En este caso, G es igual a la directividad para los arreglos.

Con esto, se puede hallar el área efectiva del arreglo de antenas, que corresponde a la eficiencia de radiación del arreglo, representada por (52) y (53):

$$A_E = \frac{G(\lambda^2)}{4\pi} = \frac{(12,649)(0,0857 \text{ m})^2}{4\pi} = 0,008945 \text{ m}^2, \text{ para el arreglo de 4 elementos} \quad (52)$$

$$A_E = \frac{G(\lambda^2)}{4\pi} = \frac{(18,974)(0,0857 \text{ m})^2}{4\pi} = 0,01782 \text{ m}^2, \text{ para el arreglo de 6 elementos} \quad (53)$$

La resistencia de radiación del arreglo de antenas tipo parche está dada por (54) y para cada arreglo se representa como (55) y (56):

$$R_{rad} = AF \frac{Q_r(2h)}{2\pi f(\epsilon_0)(\epsilon_{reff})(ab)} \quad (54)$$

$$R_{rad} = AF \frac{(0,96864)(2)(3,3213)}{2\pi(3,5*10^9 \text{ Hz})(8,854*10^{-12})(2,25402)(0,076)(2,7754)} = 69,505 \Omega, \text{ para el arreglo de} \quad (55)$$

4 elementos.

$$R_{rad} = AF \frac{(0,96864)(2)(3,3213)}{2\pi(3,5*10^9 \text{ Hz})(8,854*10^{-12})(2,25402)(0,076)(2,7754)} = 98,295 \Omega, \text{ para el arreglo de} \quad (56)$$

6 elementos.

De esta manera, el arreglo de 4 elementos dispuestos en las caras laterales de un cubo, con los tamaños W y L calculados para su operación a una frecuencia de 3500 MHz y el punto de alimentación coaxial correspondiente, fabricado en el sustrato TLY-5, se muestra en la Figura 31.

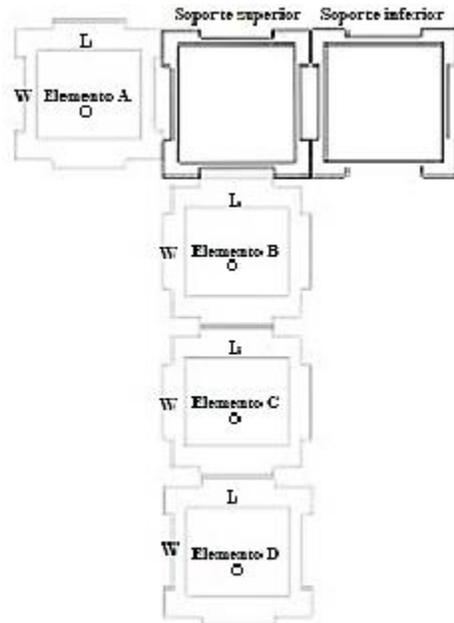


Figura 31. Diseño del arreglo de 4 elementos para operación en 3500 MHz.

De la misma forma, el arreglo de 6 elementos dispuestos en las caras laterales de un hexágono, con las dimensiones W y L calculadas para su operación a una frecuencia de 3500 MHz, los 6 elementos radiantes el punto de alimentación coaxial correspondiente, fabricado en el sustrato TLY-5, se muestra en la Figura 32.



Figura 32. Diseño del arreglo de 6 elementos para operación en 3500 MHz.

En cuanto a la elección de las geometrías de cuadrados y hexágonos, estas se basan en consideraciones prácticas y de rendimiento. Los arreglos de antenas cuadrados y hexagonales son ampliamente utilizados en aplicaciones de comunicaciones inalámbricas debido a su eficiencia y características útiles. La geometría cuadrada proporciona una disposición regular y equidistante de las antenas, lo que facilita el diseño y la implementación del arreglo. Además, el arreglo cuadrado ofrece un diagrama de radiación más sencillo y directivo, lo que puede ser beneficioso en ciertos escenarios de aplicación.

Por otro lado, la geometría hexagonal ofrece ventajas en términos de eficiencia del espectro y capacidad de cobertura. Los arreglos hexagonales permiten un uso más eficiente del espacio y una mayor capacidad de manejar interferencias, lo que es particularmente valioso en sistemas de comunicación inalámbrica con alta densidad de usuarios.

Teniendo en cuenta que el diseño de un arreglo de antenas en tres dimensiones cuenta con varias etapas, donde primer lugar, se determina que la configuración es de un arreglo conformado en el espacio. Luego, se realiza un análisis de la radiación y directividad requerida, y se realiza la selección y el diseño de los elementos de antena individuales, teniendo en cuenta la frecuencia de operación y

las características dieléctricas del sustrato utilizado. Una vez que los elementos de antena se han diseñado y optimizado en términos de ancho de banda y eficiencia, se procede a la colocación y espaciado adecuado de los elementos en el espacio tridimensional para formar el arreglo. Se emplean técnicas de simulación electromagnética para evaluar y ajustar la respuesta de radiación del arreglo en diferentes direcciones, para verificar y optimizar el rendimiento del arreglo en términos de ganancia, directividad y patrón de radiación tridimensional.

En este sentido, los patrones de radiación correspondientes para cada arreglo se muestran a continuación, teniendo en cuenta que los valores de directividad para la frecuencia requerida van aumentando conforme aumenta el número de elementos en el arreglo.

Se realiza también la simulación del arreglo de 4 elementos en SystemVue de Keysight, basado en el *template* de *RF Phased Array*, y los resultados obtenidos se visualizan en la Figura 33.

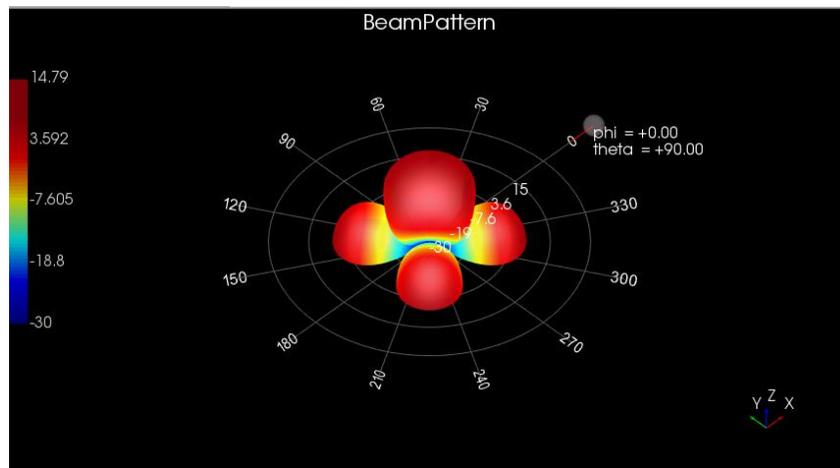


Figura 33. Patrón de radiación para el arreglo de 4 elementos en SystemVue.

Se observa un valor máximo de directividad de 13,4 dB y un valor de directividad mínimo de -32,1 dB. La mayor parte de la potencia radiada se encuentra en el frente de cada elemento, con prácticamente ningún lóbulo posterior localizado en la cara correspondiente al plano de tierra.

Así, la Figura 34 muestra el patrón de radiación del arreglo de 6 antenas *microstrip* a una frecuencia de 3500 MHz para el sustrato TLY-5.

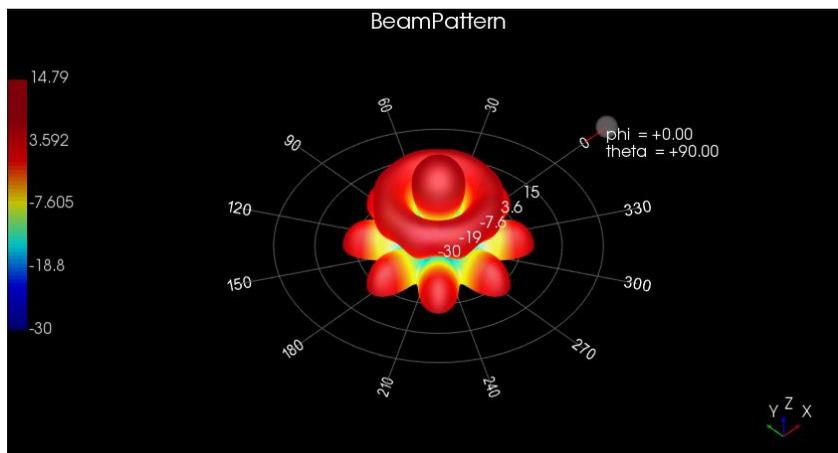


Figura 34. Patrón de radiación para el arreglo de 6 elementos en SystemVue.

Se observa un valor máximo de directividad de 14,4 dB y un valor de directividad mínimo de -24,6 dB. La mayor parte de la potencia radiada se encuentra en la parte frontal de cada elemento, con prácticamente ningún lóbulo posterior localizado en la cara correspondiente al plano de tierra.

3.3. Integración, pruebas y ajustes del sistema de comunicaciones.

La tercera etapa planteada en la metodología del proyecto, que corresponde a la integración, pruebas y ajustes, inicia con la integración de los arreglos y la realización de pruebas de campo de transmisión y recepción entre el dron y la antena fija, con la ejecución del algoritmo de conmutación diseñado. Se realizan los ajustes necesarios de la configuración del sistema, de manera que se obtenga una comunicación estable dron-antena fija.

Teniendo en cuenta los valores encontrados en las simulaciones de MATLAB y CST Studio, se dispone a realizar la construcción de los arreglos en el sustrato seleccionado. En la construcción de los arreglos se usó madera MDF (*Medium Density Fiberboard*, tablero de fibra de densidad media) para darle soporte a cada una de las caras, en disposición de cubo para el arreglo de 4 elementos y de hexágono para el arreglo de 6 elementos, como se muestra en la Figura 35. El efecto de la madera MDF sobre el desempeño de los arreglos es mínimo, ya que la permitividad relativa o constante dieléctrica de la madera MDF es $\epsilon_r = 3$. La madera MDF se considera un material dieléctrico o

aislante en aplicaciones prácticas, ya que tiene una estructura porosa y está compuesta principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que le confiere características dieléctricas. Como aislante dieléctrico, este tipo de madera tiene una baja conductividad eléctrica y puede soportar altos voltajes sin permitir la transferencia significativa de corriente eléctrica.

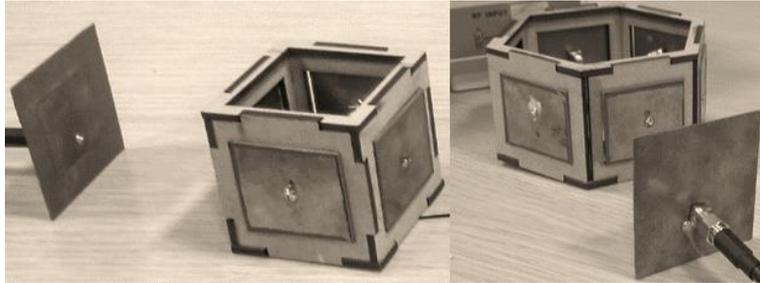


Figura 35. Construcción de los arreglos de 4 elementos (izq.) y de 6 elementos (der.) en el sustrato TLY-5.

Después de culminar la construcción de los arreglos, se elige la configuración más adecuada para probar y evaluar el funcionamiento de los arreglos en el laboratorio de telecomunicaciones de la Institución, teniendo en cuenta que esta disposición debe extrapolarse a un cultivo real.

La imagen del terreno para el cual se representa y se extrapola este estudio es observa en la Figura 36, donde también se muestran las alturas usadas y las ubicaciones de la estación terrena fija y el arreglo ubicado en el dron. La altura h_G , que corresponde a la altura de la estación terrena, se tomó en 0,1 m; la altura del arreglo de antenas, representada por h_{UAV} se fijó en 1,2 m. La distancia d_h que representa la distancia entre la estación terrena fija y la posición del dron, corresponde a 2 m, 4 m, y 6 m. El ángulo $theta$ (θ) corresponde al *tilt* o inclinación de la antena de la estación terrena, que se mantuvo en un valor de $11,3^\circ$ respecto de la vertical. De esta manera, se acotó un área de pruebas de 12 m^2 que puede extrapolarse a un área real de cultivo de 48 m^2 .

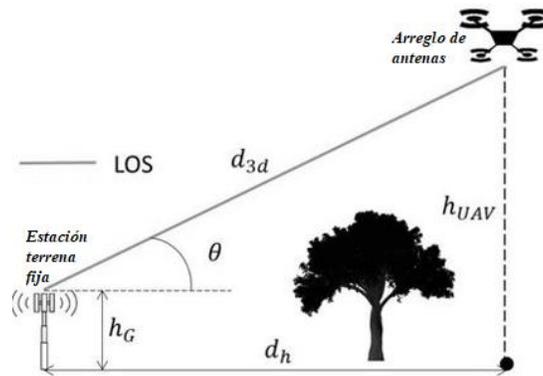


Figura 36. Disposición de distancias y alturas usadas en las pruebas de laboratorio.

Se procede a la caracterización del patrón de radiación de las caras de los arreglos, tanto de 4 como de 6 elementos, para observar su comportamiento respecto a las simulaciones en MATLAB. Para esto se halla el valor de HPBW o ancho de haz de mitad de potencia, que corresponde al ángulo de apertura efectivo de la antenna. Este valor simulado es igual a 82° , como se observa en la Figura 37.

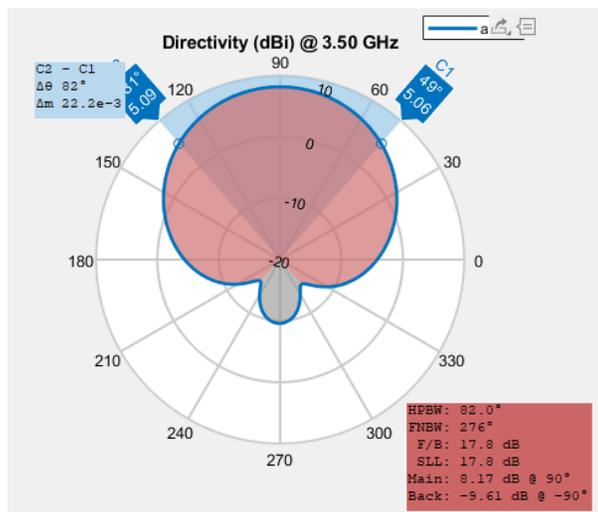


Figura 37. Ancho de haz de mitad de potencia (HPBW) para cada elemento del arreglo.

Para realizar las pruebas de laboratorio en ambiente controlado, se siguió un protocolo de pruebas físicas, en el que inicialmente, se realiza la configuración de la estación terrena fija que transmite un

tono a 3,5 GHz, para lo cual se usa el USRP 2954 RIO de National Instruments, controlado mediante el software LabVIEW Communications con conexión PCI x4. La estación terrena se encuentra ubicada en el punto superior de la disposición indicado en la Figura 38. Los arreglos de 4 y 6 elementos fueron ubicados en las diferentes posiciones (1 a 3) detalladas también en la Figura 38, y para el arreglo de 6 elementos se añaden 4 posiciones adicionales (4 a 6) que corresponden a casos críticos de funcionamiento, de manera que se pudieran comprobar sus características de funcionamiento en la recepción a varios ángulos y distancias de separación con la estación terrena.

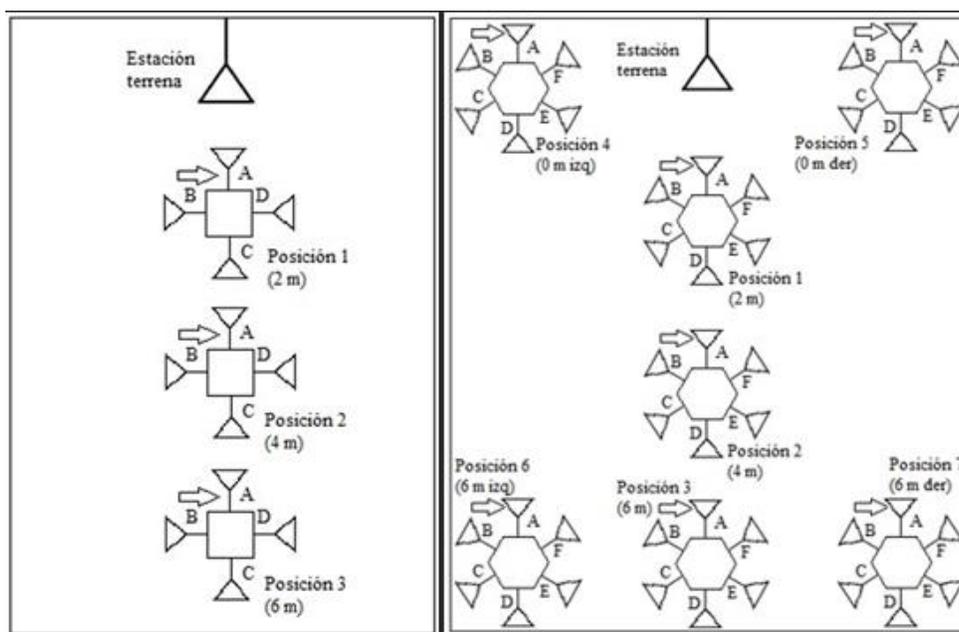


Figura 38. Ubicaciones de la estación terrena y los arreglos de 4 elementos (izq.) y 6 elementos (der.)

Se realizó la conexión de los arreglos de antenas con el dispositivo Arduino Mega 2560, que permite la detección de los niveles de potencia RSSI recibidos en cada uno de los elementos, a medida que va girando el arreglo en el sentido de las manecillas del reloj. También se conecta el sistema de conmutación, cuyo elemento central es el dispositivo transmisor HackRF One, que transmite un tono en el sentido arreglo-estación terrena.

La recopilación de los niveles de potencia de señal recibida RSSI se realiza en el algoritmo de Arduino IDE, de manera que se discriminen los niveles de potencia más altos recibidos en el elemento y conmute la transmisión del tono generado por el HackRF One a dicho elemento. El diagrama de

bloques que representa esta configuración con la placa Arduino y su posterior procesamiento se observa en la Figura 39. En la Figura 40, se ilustra la configuración para las pruebas realizadas en el laboratorio de telecomunicaciones de la Institución. El controlador Arduino controla la conmutación con un algoritmo de búsqueda para encontrar el elemento del arreglo con la máxima potencia de señal recibida.

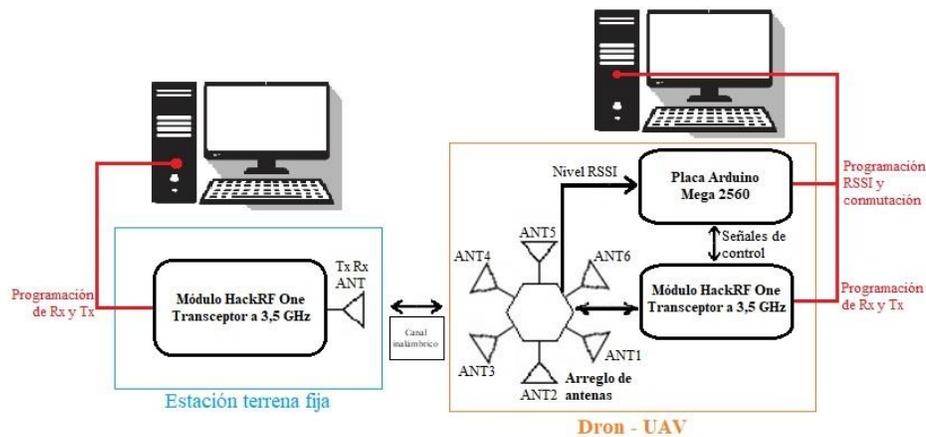


Figura 39. Diagrama de bloques del sistema implementado para las pruebas.



Figura 40. Configuración de las pruebas para la medición de RSSI de los arreglos en el laboratorio de telecomunicaciones.

Inicialmente, se comprueba la transmisión correcta del tono a 3,5 GHz transmitido por la estación terrena fija, mediante el analizador de señales vectoriales de Keysight Technologies, que se muestra en la Figura 41.

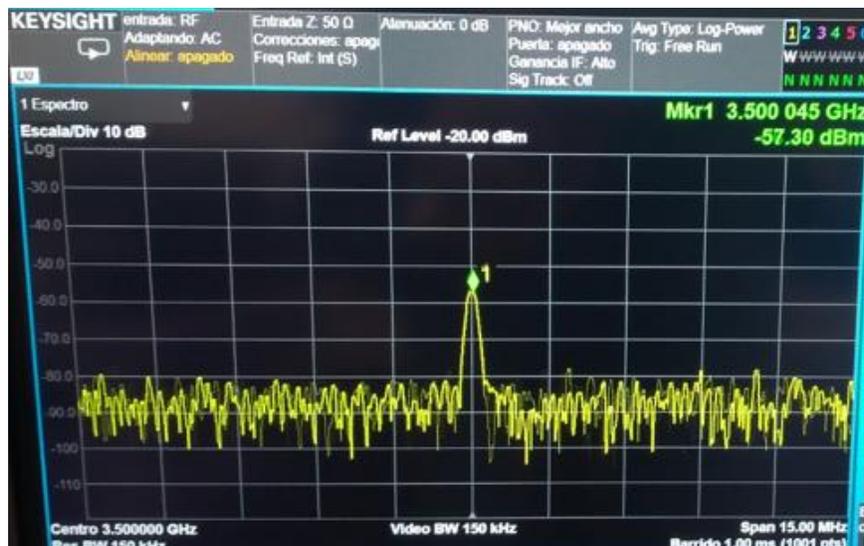


Figura 41. Señal transmitida por la estación terrena fija a 3,5 GHz.

Posteriormente, se procede a realizar la ejecución del enlace bidireccional de manera simultánea, para confirmar la transmisión de las señales desde la estación terrena, así como desde el dron, siguiendo la estructura del algoritmo que se presenta en la Figura 42. Este algoritmo implementado en el entorno de Arduino IDE sigue un proceso que realiza el cálculo de RSSI en los elementos del arreglo, teniendo en cuenta la velocidad del giro del kit de antenas del laboratorio, que tiene una velocidad de giro completo de 360° en 32 segundos, versus la velocidad de giro del dron que se usa como referencia para la extrapolación a un entorno real, en este caso el dron DJI Phantom Pro, que tiene un tiempo de giro de 250° en 1 segundo, por lo que para dar el giro completo de 360° necesita de 1,44 segundos, que es lo que se demora en dar una vuelta completa. De esta forma, de los 1,44 segundos totales de giro, durante 240 ms cada elemento del arreglo se enfrenta a la estación terrena, de esta manera se realiza la ejecución del algoritmo de detección y conmutación seleccionado.

Teniendo en cuenta que se fabricaron 2 arreglos para corroborar las hipótesis propuestas en el proyecto, se dispone a probar cada uno de los arreglos, iniciando con el arreglo de 4 elementos, para

continuar con el arreglo de 6 elementos, Los resultados de estas pruebas realizadas, así como el análisis de los mismos, se presentan en la sección siguiente.

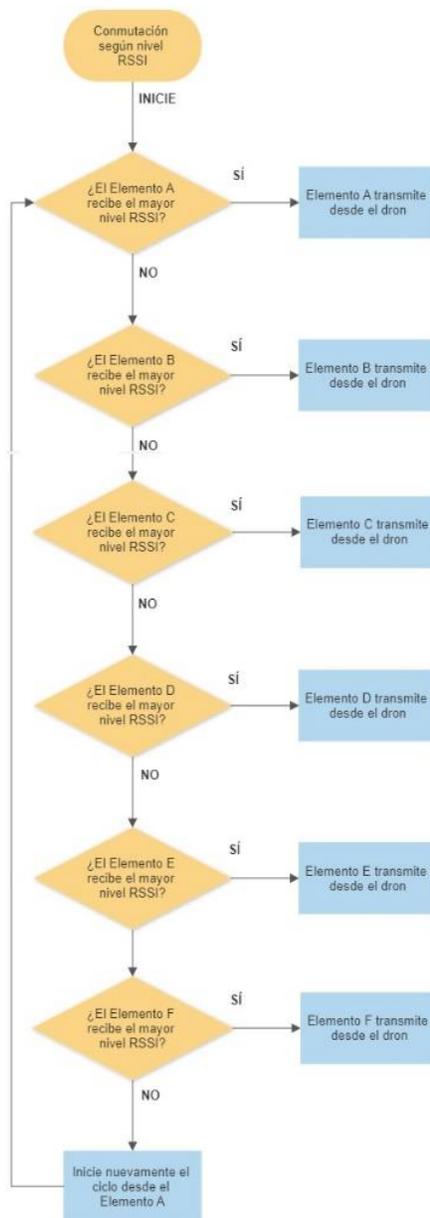


Figura 42. Diagrama del algoritmo implementado para la conmutación de los elementos en el arreglo.

Capítulo 4. Pruebas, resultados y discusión de resultados

En este capítulo se muestra, inicialmente, las pruebas realizadas para la evaluación del arreglo de antenas inteligentes que, ubicado en un dron, se comunican mediante enlace de radio de microondas con una estación terrena fija en la banda de 3,5 GHz. Los resultados obtenidos en las pruebas buscan evaluar la funcionalidad del arreglo de antenas y la calidad del enlace.

Después de la fabricación de la antena *microstrip* individual para su uso en la estación terrena fija en conexión con el USRP, y de los arreglos *microstrip* de 4 y 6 elementos para su uso en el dron, se procedió a realizar su respectiva evaluación en los laboratorios de la Institución; para lo cual se integró con el Kit Entrenador de Antenas ED-3200 del laboratorio de telecomunicaciones (Figura 43).

La calidad del enlace bidireccional a 3,5 GHz se evalúa mediante los parámetros de relación señal a ruido, disponibilidad del enlace y ancho de banda. Se conmuta la antena y se recibe la señal, mientras el arreglo gira alrededor del transmisor de la estación terrena. La señal que va a ser transmitida a esa frecuencia se genera por medio del USRP-2954R, a través del software LabVIEW Communications de National Instruments. El protocolo de pruebas detallado se encuentra en el Anexo 3.

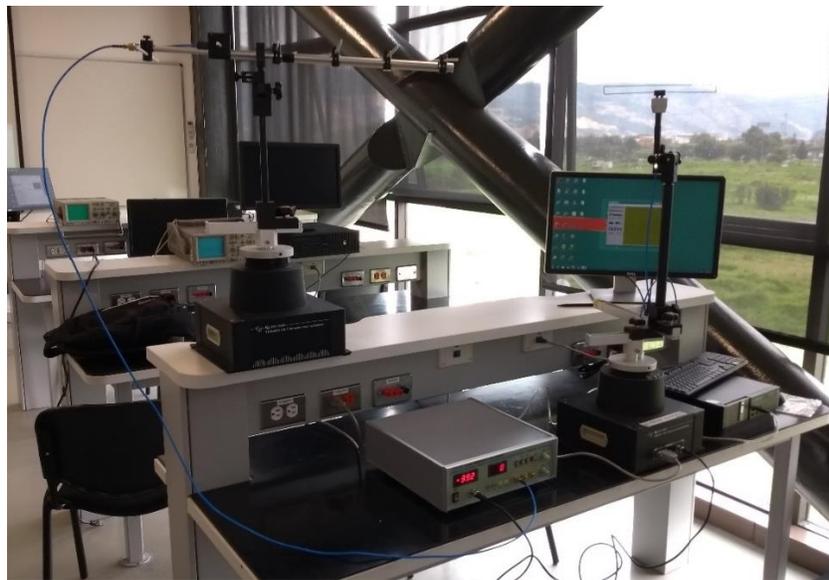


Figura 43. Kit Entrenador de Antenas ED-3200 del laboratorio de telecomunicaciones.

4.1. Evaluación de los parámetros físicos de operación de los elementos de los arreglos.

La caracterización de algunos parámetros del arreglo: coeficiente de reflexión (S11) de -12,2 dB a 3,5 GHz y razón de onda estacionaria (VSWR) de nivel 1,648, se hizo en el equipo FieldFox N9918A de Keysight; éstos se muestran en la Figura 44 y Figura 45.

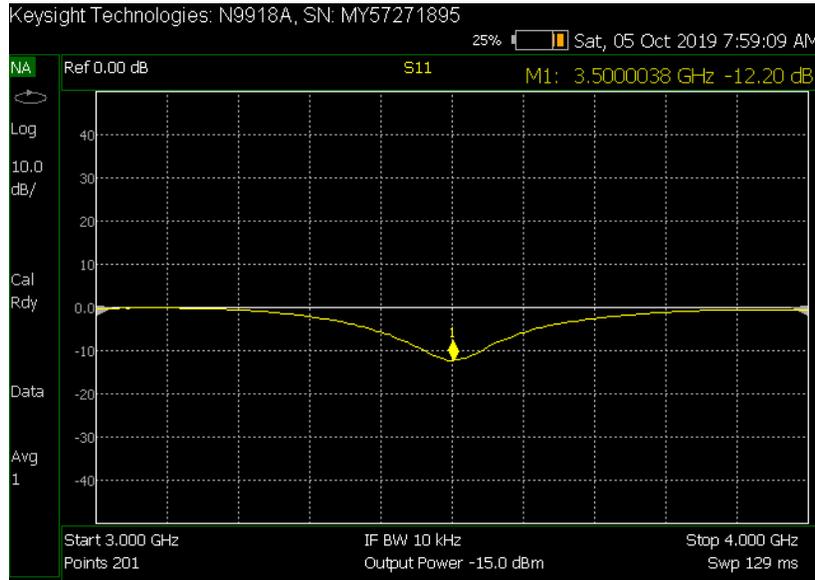


Figura 44. Parámetros de dispersión S11 de los elementos del arreglo a 3,5 GHz.

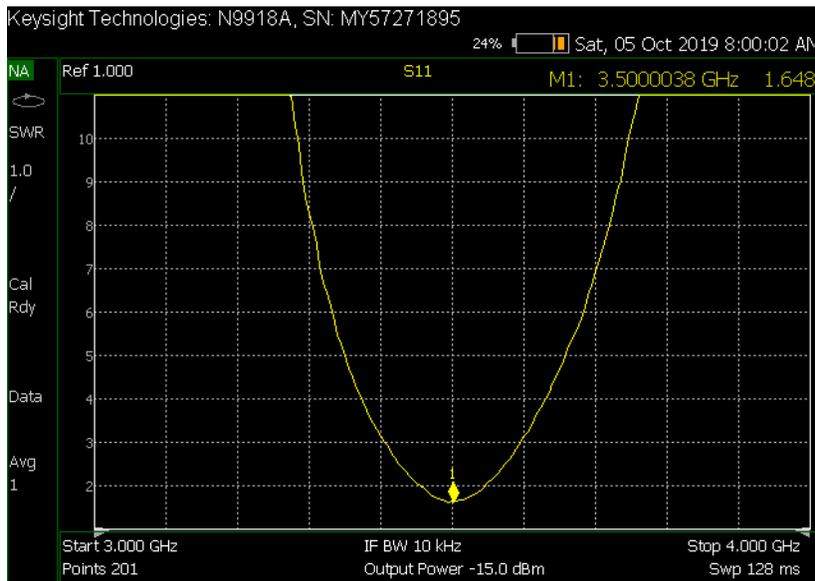


Figura 45. VSWR de los elementos del arreglo a 3,5 GHz.

4.2. Resultados.

- **Arreglo de 4 elementos:**

1. **Enlace estación terrena – dron.**

Los resultados obtenidos con el arreglo de 4 elementos, para 3 distancias diferentes (2, 4 y 6 metros), se muestran en la Figura 46. En ella, el eje x corresponde a los 360 grados de giro del arreglo, mientras que el eje y corresponde a los valores de RSSI recibidos. El orden de giro de los 4 elementos se asumió en el sentido horario.

Para este tipo de arreglo se espera que para cubrir los 360° de un giro del dron, el ancho de haz de cada elemento del arreglo debe cubrir 90° ; sin embargo, la Figura 47 evidencia que, para cada elemento, sólo se detectan los niveles RSSI para un ancho de haz menor o igual a 40° del giro de cada elemento, de manera que no se detectan señales provenientes de la estación para el resto del ancho de haz esperado, es decir 50° por elemento. El giro del arreglo equivale a una velocidad angular de $11,25^\circ/\text{s}$, tiempo por revolución de 32 s y el tiempo equivalente por sector de cubrimiento de un elemento del arreglo es de 8 s.

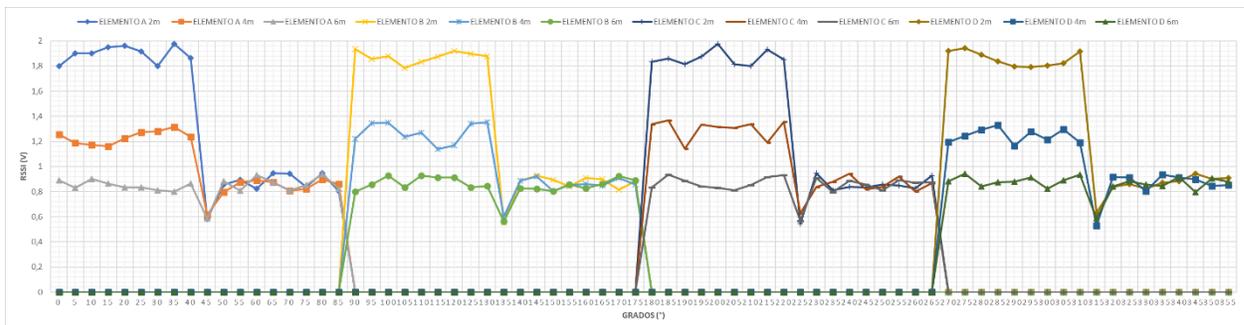


Figura 46. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 4 elementos, enlace estación terrena dron.

Para una distancia de 2 m entre el arreglo y la estación terrena, se encuentran valores de RSSI entre 1,8 y 2 V, siendo los valores máximos encontrados. Para una distancia de 4 m, los valores RSSI están en un rango entre 1,1 y 1,3 V. Estos valores se encuentran en un rango desde 0° hasta los 40° del giro.

Sin embargo, desde los 40° hasta los 90° del giro del arreglo, es muy bajo el nivel RSSI independiente de la distancia, ya que se obtienen valores RSSI inferiores a 1 V, lo que sitúa a esta señal por debajo

de los 3 dB, por lo que no puede ser considerada como información confiable la señal proveniente de la estación terrena, con la imposibilidad de realizar un proceso de conmutación confiable entre los elementos del arreglo.

La razón de esta zona oscura o espacio en blanco se debe al ancho de haz de cada elemento, que no cubre la totalidad de los 90°, afectando una comunicación continua con la estación terrena y viceversa, teniendo que cuenta que este resultado obtenido corresponde al enlace de la estación terrena al arreglo ubicado en el dron.

2. Enlace dron – estación terrena.

De manera análoga, el efecto de este resultado aparece en el enlace de regreso, desde el dron a la estación terrena, donde se obtiene un resultado similar, con menores niveles máximos de RSSI, pero también se presenta la misma zona oscura que va desde los 40° del giro del elemento hasta sus 90°, como se observa en la Figura 47.

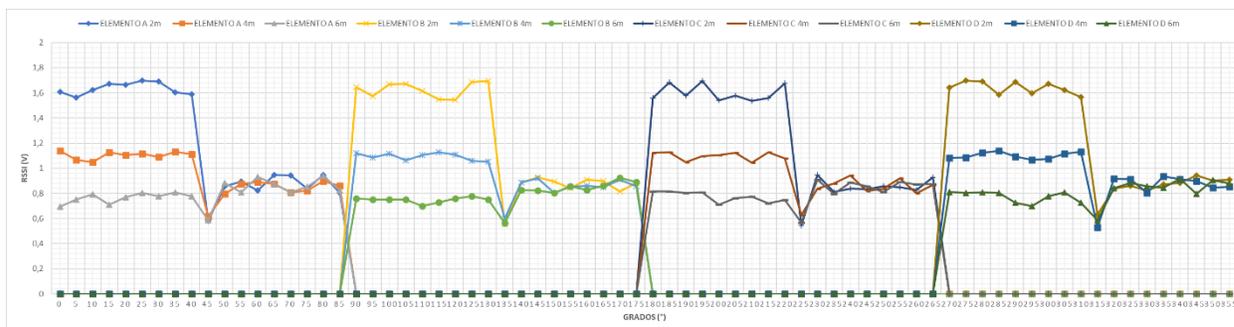


Figura 47. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 4 elementos, enlace dron-estación terrena.

- **Arreglo de 6 elementos.**

1. Enlace estación terrena – dron.

Para las pruebas realizadas con el arreglo de 6 elementos, en el sentido del enlace transmitiendo desde la estación terrena y recibiendo señal en el arreglo ubicado en el dron, para 3 distancias diferentes (2, 4 y 6 metros), se obtuvieron los siguientes resultados de la Figura 48. En ella, el eje x corresponde a los 360 grados de giro del arreglo, mientras que el eje y corresponde a los valores de RSSI recibidos.

El orden de giro de los 6 elementos se asumió en el sentido horario. Se observa que, para cada elemento, se detectan los niveles RSSI cada 60°, de manera que son detectadas las señales provenientes de la estación terrena en la totalidad de los 360 grados correspondientes al giro del arreglo. El giro del arreglo equivale a una velocidad angular de 11,25°/s, tiempo por revolución de 32 s y el tiempo equivalente por sector de cubrimiento de un elemento del arreglo es de 5,33 s.

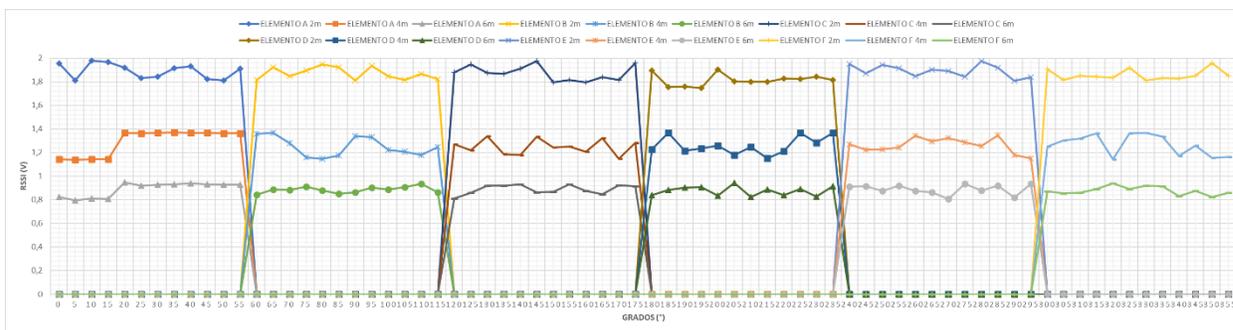


Figura 48. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos (enlace estación terrena-dron).

Para una distancia de 2 m entre el arreglo y la estación terrena, se encuentran valores de RSSI entre 1,8 y 2 V, siendo los valores máximos encontrados. Para una distancia de 4 m, los valores RSSI están en un rango entre 1,1 y 1,3 V. Estos valores se encuentran en un rango desde 0° hasta los 55° del giro, ya que se considera el ancho de banda equivalente al ancho de haz de cada elemento, un porcentaje de ancho de haz no se cubre debido a la pérdida de campo por efectos de borde, en esos puntos se dispersa el campo, teniendo en cuenta que el área efectiva de radiación de un elemento no es igual al área física del mismo.

Al llegar a los 60° del giro, el siguiente elemento nuevamente recibe el nivel RSSI máximo, por lo que no hay ninguna porción del giro, con un margen de error entre el 5 y 10 %, en la que no se detecte señal proveniente de la estación terrena. Esto sucede para las distancias de 2 y 4 m. Para la distancia de 6 m se obtienen valores RSSI inferiores a 1 V, lo que hace muy bajo la señal proveniente de la estación terrena con la imposibilidad de realizar un proceso de conmutación confiable entre los elementos del arreglo.

Debido a que esta disposición garantiza la comunicación estable entre la estación terrena y el dron a lo largo de los 360°, se procedió a realizar pruebas adicionales en los casos críticos que corresponden

a las posiciones 4 a 7 de la Figura 38, cuyos resultados se muestran a continuación, en las Figuras 49, 50, 51 y 52, respectivamente.

Para la posición 4, representada en la Figura 49, es decir, con el dron en el extremo izquierdo más cercano a la estación dentro del plano acotado de pruebas, la Figura 50 muestra los resultados obtenidos para el enlace entre la estación terrena fija y el dron. Debido a su ubicación en una esquina, entre los 40 y 55° de giro del arreglo el nivel RSSI recibido disminuye considerablemente.

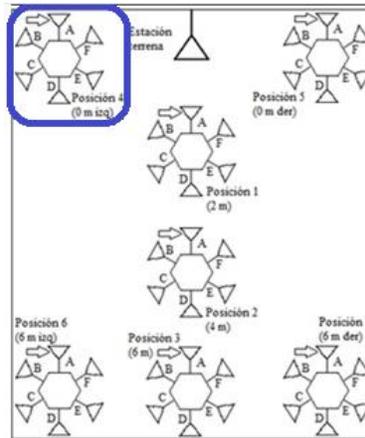


Figura 49. Posición 4, estación terrena-dron.

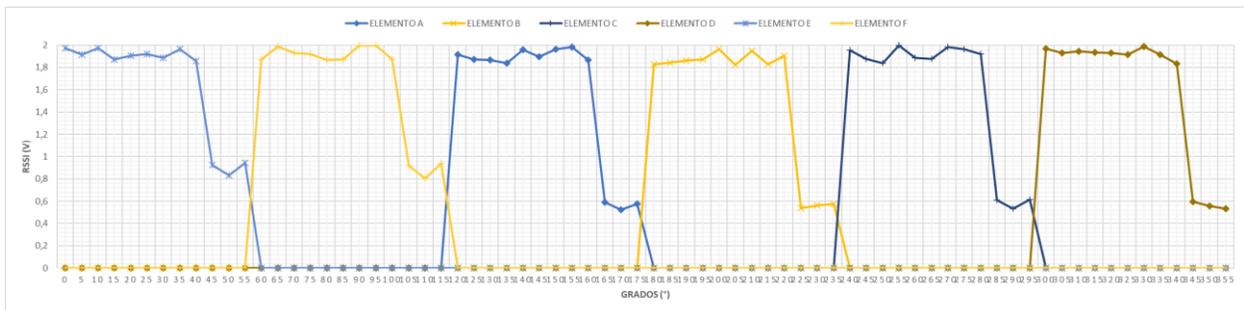


Figura 50. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos para la posición 4. (enlace estación terrena-dron).

Para esta ubicación se encuentran valores de RSSI entre 1,8 y 2 V. Estos valores se encuentran en un rango desde 0° hasta los 40° del giro. Entre los 40 y 60° del giro se obtienen valores RSSI inferiores a 1 V, lo que hace muy baja la señal proveniente de la estación terrena.

La Figura 52 muestra los resultados obtenidos para el enlace entre la estación terrena fija y el dron en la posición 5 (Figura 51), es decir, con el dron en el extremo derecho más cercano a la estación dentro del plano acotado de pruebas. Nuevamente, debido a su ubicación en una esquina, entre los 40 y 55° de giro del arreglo el nivel RSSI recibido disminuye considerablemente.

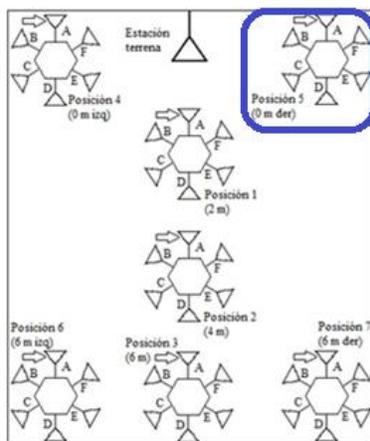


Figura 51. Posición 5, estación terrena-dron.



Figura 52. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos para la posición 5. (enlace estación terrena-dron).

Para esta ubicación se encuentran valores de RSSI entre 1,8 y 2 V. Estos valores se encuentran en un rango desde 0° hasta los 40° del giro. Entre los 40 y 60° del giro se obtienen valores RSSI inferiores a 1 V, cercanos a 0,6 V, lo que hace muy baja la señal proveniente de la estación terrena en este rango del giro.

La Figura 54 muestra los resultados obtenidos para el enlace entre la estación terrena fija y el dron en la posición 6 (Figura 53), es decir, con el dron en el extremo izquierdo más lejano a la estación dentro

del plano acotado de pruebas. A diferencia de las posiciones donde el dron se ubicaba en frente de la estación terrena a diferentes distancias y de las posiciones donde el dron estaba cerca de la estación en las esquinas del plano, ahora, debido a su ubicación en uno de los extremos del plano acotado, el nivel RSSI recibido por el arreglo disminuye considerablemente, por lo que la discriminación de los niveles RSSI para esta posición y la posterior conmutación del elemento, se hace dificultosa.

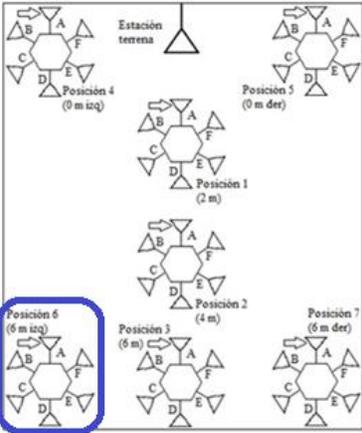


Figura 53. Posición 6, estación terrena-dron.

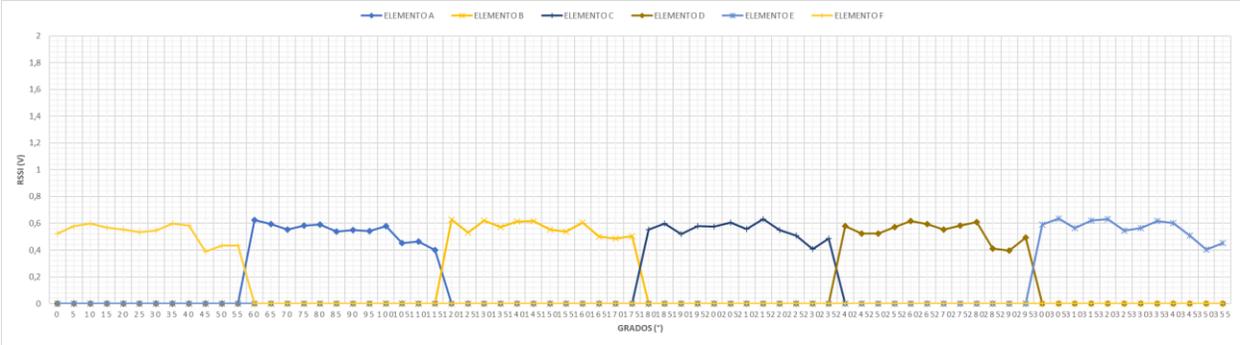


Figura 54. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos para la posición 6. (enlace estación terrena-dron).

Para esta distancia de 6 m entre el arreglo y la estación terrena, se encuentran valores de RSSI entre 0,4 y 0,6 V. Al ser valores RSSI inferiores a 1 V, es muy bajo el nivel de la señal proveniente de la estación terrena entre los 60 grados del giro correspondiente a cada elemento.

Finalmente, la Figura 56 muestra los resultados obtenidos para el enlace entre la estación terrena fija y el dron en la posición 7 (Figura 55), es decir, con el dron en el extremo derecho más lejano a la

estación dentro del plano acotado de pruebas. A diferencia de las posiciones donde el dron se ubicaba en frente de la estación terrena a diferentes distancias y de las posiciones donde el dron estaba cerca de la estación en las esquinas del plano, ahora, debido a su ubicación en uno de los extremos del plano acotado, el nivel RSSI recibido por el arreglo disminuye considerablemente, por lo que la discriminación de los niveles RSSI para esta posición y la posterior conmutación del elemento, se hace difícil.

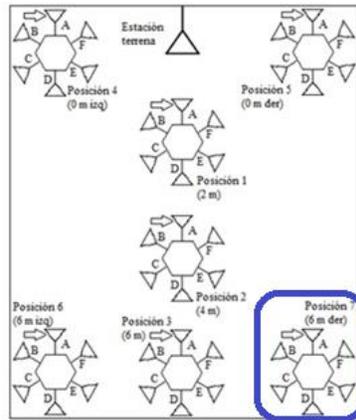


Figura 55. Posición 7, estación terrena-dron.

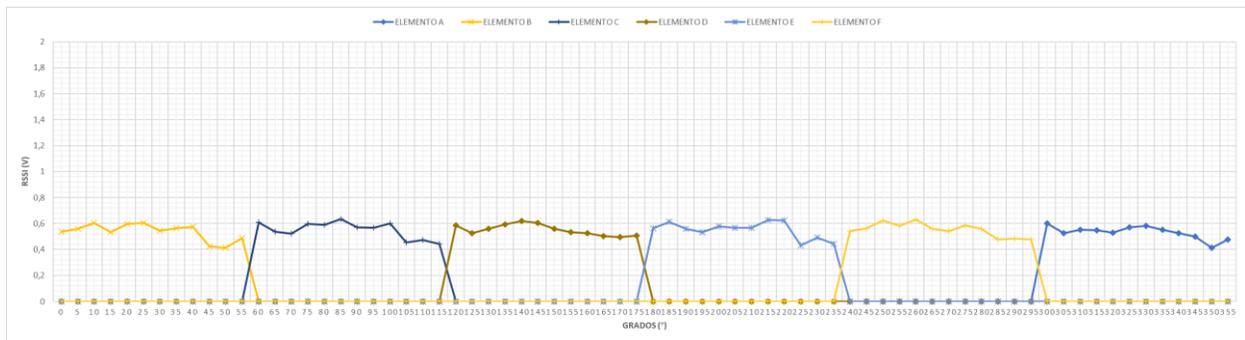


Figura 56. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos para la posición 7. (enlace estación terrena-dron).

Para esta distancia de 6 m entre el arreglo y la estación terrena, se encuentran valores de RSSI entre 0,4 y 0,6 V. Al ser valores RSSI inferiores a 1 V, es mínima la señal proveniente de la estación terrena entre los 60° del giro correspondiente a cada elemento.

2. Enlace dron – estación terrena.

Para las pruebas realizadas con el arreglo de 6 elementos, ahora en el sentido del enlace transmitiendo desde el dron y recibiendo señal en la estación terrena, para 3 distancias diferentes (2, 4 y 6 metros), se obtuvieron los siguientes resultados de la Figura 57. Se observa que, para cada elemento, se detectan los niveles RSSI cada 60°, de manera que son detectadas las señales provenientes de la estación terrena en la totalidad de los 360° correspondientes al giro del arreglo.

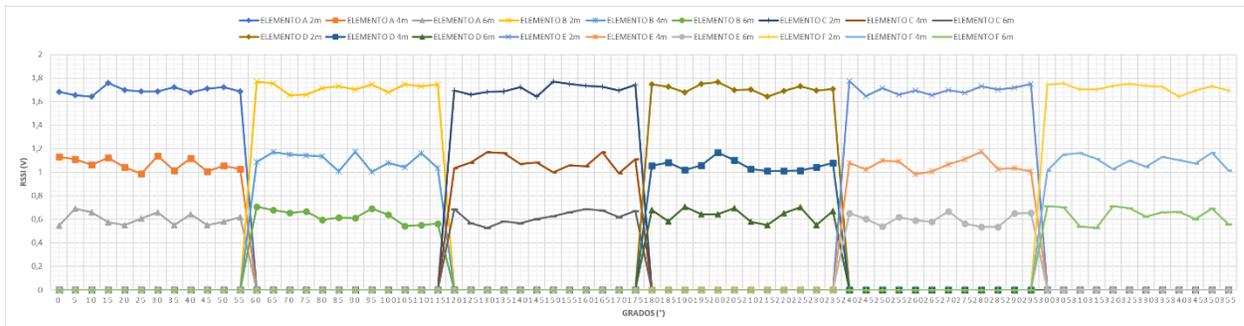


Figura 57. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos (enlace dron – estación terrena).

Para una distancia de 2 m entre el arreglo y la estación terrena, se encuentran valores de RSSI entre 1,6 y 1,8 V, siendo los valores máximos encontrados. Para una distancia de 4 m, los valores RSSI están en un rango entre 1,0 y 1,2 V. Estos valores se encuentran en un rango desde 0° hasta los 55° del giro.

Al llegar a los 60° del giro, el siguiente elemento nuevamente recibe el nivel RSSI máximo, por lo que no hay ninguna porción del giro en la que no se detecte señal proveniente de la estación terrena, teniendo en cuenta un rango pequeño, entre 5 o 10% del giro en el que puede ocurrir alguna transición no detectada por las áreas efectivas de radiación. Esto sucede para las distancias de 2 y 4 m. Para la distancia de 6 m se obtienen valores RSSI inferiores a 0,7 V, lo que hace mínimo el valor de la señal proveniente del dron con la imposibilidad de realizar un proceso de conmutación confiable entre los elementos del arreglo, ya que está por debajo de -3 dB. Los valores RSSI obtenidos en este enlace dron-estación terrena son menores que los obtenidos en el enlace estación terrena-dron en todas las tres distancias.

Debido a que esta disposición garantiza la comunicación estable entre el dron y la estación terrena, se procedió a realizar pruebas adicionales en los casos críticos que corresponden a las posiciones 4 a 7 de la Figura 38, cuyos resultados se muestran a continuación, en las Figuras 54, 55, 56 y 57, respectivamente.

La Figura 59 muestra los resultados obtenidos para el enlace entre el dron y la estación terrena en la posición 4 (Figura 58), es decir, con el dron en el extremo izquierdo más cercano a la estación dentro del plano de pruebas. A diferencia de las posiciones donde el dron se ubicaba en frente de la estación terrena a diferentes distancias, debido a su ubicación en una esquina, hay 10° del giro en los que el nivel RSSI recibido por el arreglo disminuye considerablemente. Esta misma situación se presentó en la dirección inversa del enlace.

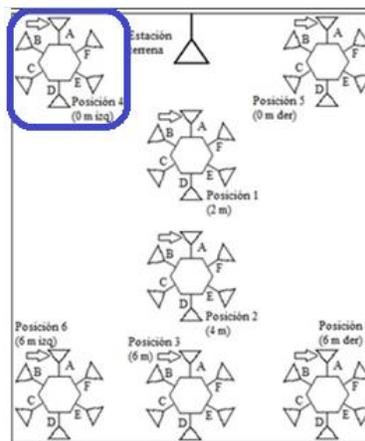


Figura 58. Posición 4, dron-estación terrena.

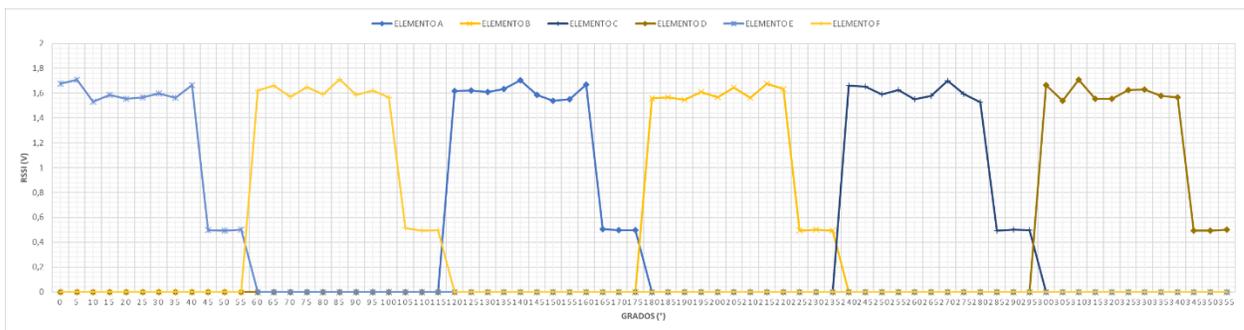


Figura 59. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos para la posición 4. (enlace dron – estación terrena).

Para esta distancia entre el arreglo y la estación terrena, se encuentran valores de RSSI entre 1,5 y 1,7 V. Estos valores se encuentran en un rango desde 0° hasta los 40° del giro. Entre los 40 y 60° del giro se obtienen valores RSSI inferiores a 0,6 V, lo que hace prácticamente indetectable la señal proveniente del dron.

De manera análoga, la Figura 61 muestra los resultados obtenidos para el enlace entre el dron y a estación terrena en la posición 5 (Figura 60), es decir, con el dron en el extremo derecho más cercano a la estación dentro del plano acotado de pruebas. Nuevamente, a diferencia de las posiciones donde el dron se ubicaba en frente de la estación terrena a diferentes distancias, debido a su ubicación en una esquina, hay 10° del giro en los que el nivel RSSI recibido por el arreglo disminuye considerablemente.

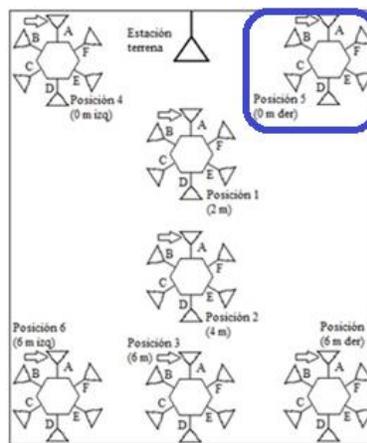


Figura 60. Posición 5, dron-estación terrena.

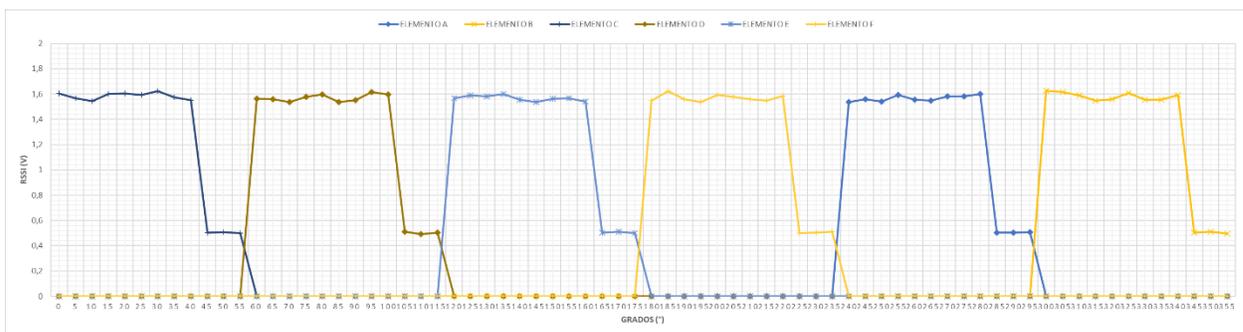


Figura 61. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos para la posición 5. (enlace dron – estación terrena).

Para esta distancia entre el arreglo y la estación terrena, se encuentran valores de RSSI cercanos a 1,6 V. Estos valores se encuentran en un rango desde 0° hasta los 40° del giro. Entre los 40 y 60° del giro se obtienen valores RSSI inferiores cercanos a 0,5 V, lo que hace muy pequeña la señal proveniente del dron en este rango del giro.

La Figura 63 muestra los resultados obtenidos para el enlace entre el dron y la estación terrena en la posición 6 (Figura 62), es decir, con el dron en el extremo izquierdo más lejano (6 m) a la estación dentro del plano acotado de pruebas. A diferencia de las posiciones donde el dron se ubicaba en frente de la estación terrena a diferentes distancias y de las posiciones donde el dron estaba cerca de la estación en las esquinas del plano, ahora, debido a su ubicación en uno de los extremos del plano acotado, el nivel RSSI recibido por el arreglo disminuye considerablemente, por lo que la discriminación de los niveles RSSI para esta posición y la posterior conmutación del elemento, se hace muy difícil. Misma situación ocurre con el enlace en la dirección inversa (ET-dron).

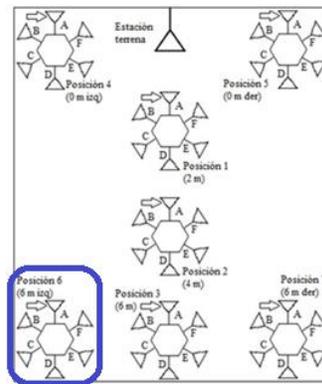


Figura 62. Posición 6, dron-estación terrena.

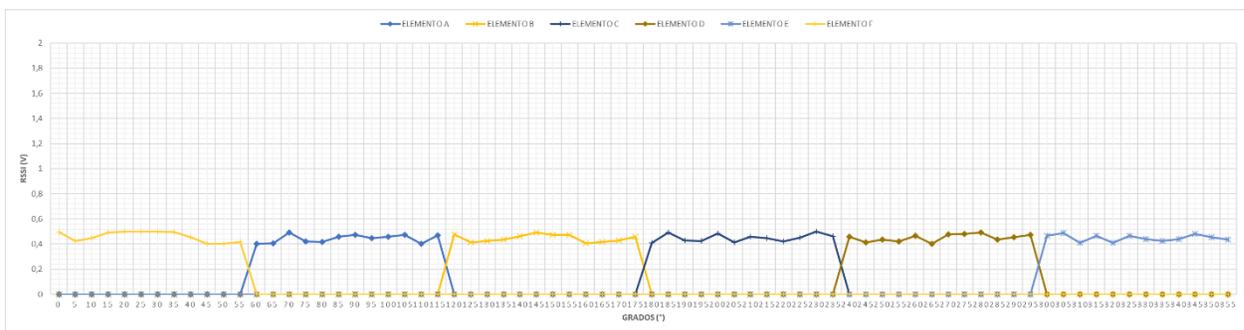


Figura 63. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos para la posición 6. (enlace dron – estación terrena).

Para esta distancia de 6 m entre el arreglo y la estación terrena, se encuentran valores de RSSI cercanos a 0,5 V. Al ser valores RSSI muy inferiores a 1 V, es mínimo el nivel de la señal proveniente del dron entre los 60° del giro correspondiente a cada elemento.

Por último, la Figura 65 muestra los resultados obtenidos para el enlace entre el dron y la estación terrena en la posición 7, vista en la Figura 64, es decir, con el dron en el extremo derecho más lejano a la estación dentro del plano acotado de pruebas. A diferencia de las posiciones donde el dron se ubicaba en frente de la estación terrena a diferentes distancias y de las posiciones donde el dron estaba cerca de la estación en las esquinas del plano, ahora, debido a su ubicación en uno de los extremos del plano acotado, el nivel RSSI recibido por el arreglo disminuye considerablemente, por lo que la discriminación de los niveles RSSI para esta posición y la posterior conmutación del elemento, se hace muy difícil.

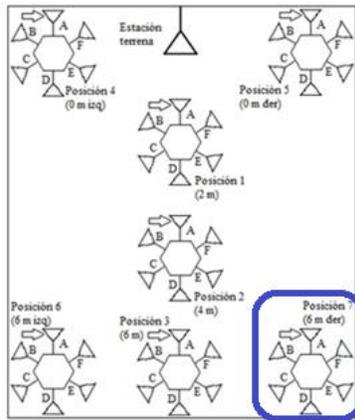


Figura 64. Posición 7, dron-estación terrena.

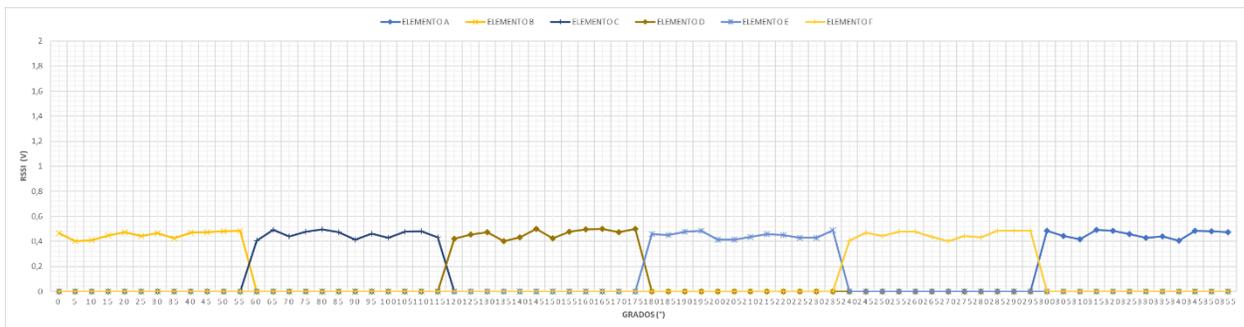


Figura 65. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio con el arreglo de 6 elementos para la posición 7. (enlace dron – estación terrena).

Para esta distancia de 6 m entre el arreglo y la estación terrena, se encuentran valores de RSSI cercanos a 0,5 V. Al ser valores RSSI bastante inferiores a 1 V, es muy baja la señal proveniente del dron entre los 60° del giro correspondiente a cada elemento.

Para corroborar el funcionamiento de los enlaces, las señales generadas se monitorean en tiempo real en el analizador de señales de Keysight. Desde el HackRF One se transmite con una potencia de 3 mW a una distancia de 4 metros respecto del arreglo. En la Figura 66, se observa que la potencia de la señal transmitida por la estación terrena al dron es de -48,85 dBm con una frecuencia de 3,5 GHz, identificada por el marcador 1 en la pantalla del dispositivo. La señal transmitida por la estación terrena no se ubica en la misma frecuencia que la señal transmitida por el dron para efectos de visualización, teniendo en cuenta además que este espaciamiento entre señales de 1 MHz está dentro del rango del ancho de banda calculado de 35 MHz.

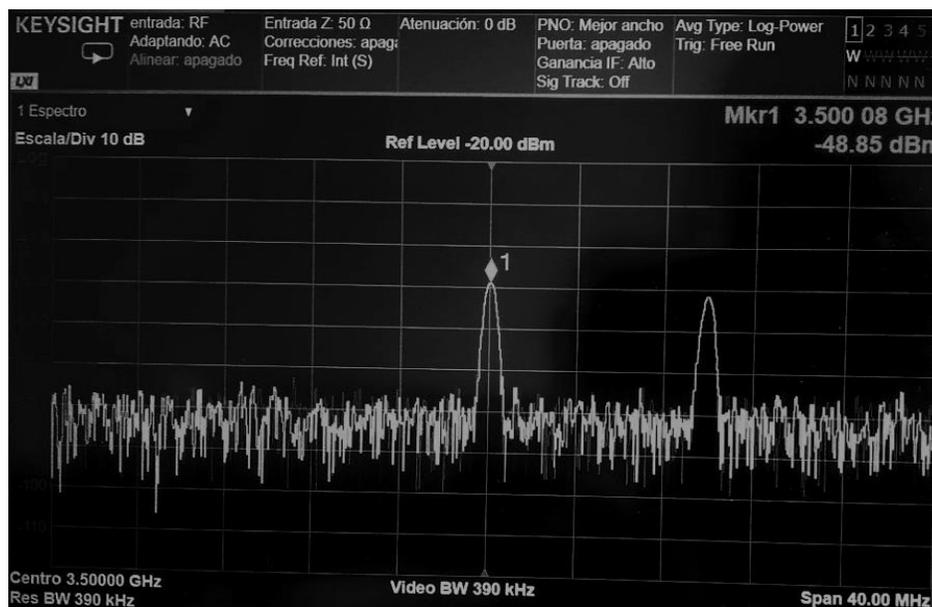


Figura 66. Señal transmitida por la estación terrena en las pruebas de conmutación (Marcador 1).

En la Figura 67, se observa que la potencia de la señal transmitida por el dron hacia la estación terrena es de -51,44 dBm con una frecuencia de 3,51 GHz, identificada por el marcador 1 en la pantalla del dispositivo. Esta señal proveniente del dron es de menor potencia que la de la estación terrena.

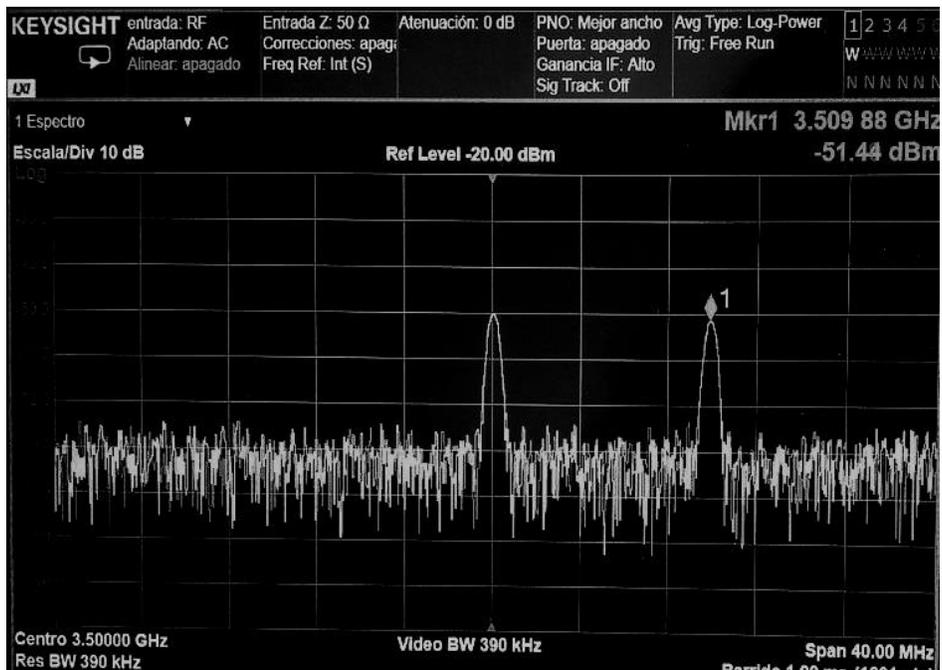


Figura 67. Señal transmitida por el dron en las pruebas de conmutación (Marcador 1)

La señal transmitida por la estación terrena y por el dron tienen niveles que difieren en cerca de 3 dB debido a la radiación de ondas de superficie que se propagan a lo largo del sustrato dieléctrico, lo que ocasiona pérdidas de radiación y una menor eficiencia en la transferencia de energía. Esto produce que las potencias transmitidas por el arreglo ubicado en el dron sean menores a las transmitidas por la antena individual de la estación terrena, a pesar que la potencia nominal del dispositivo transmisor HackRF One es la misma en ambos casos, en un rango de 0 dBm a 5 dBm (3 mW) visualizada en el analizador de señales.

3. SNR del enlace.

Los valores de relación señal a ruido (SNR) pueden variar dependiendo de la aplicación y los requisitos específicos del sistema. Para una transmisión de datos confiable y sin errores, se requiere un SNR de al menos 20 dB (Tse, 2005) para aplicaciones de datos simples o para aplicaciones de datos más exigentes a nivel agrícola, como video e imágenes provenientes del dron. La SNR se calculó únicamente para el arreglo de 6 elementos, debido a que de acuerdo con el análisis de los

niveles RSSI de la sección anterior, el arreglo de 4 elementos no cumple con las características necesarias para cubrir los 360° del giro.

Teniendo en cuenta que el valor de piso de ruido detectado por el N9000B en las pruebas controladas de laboratorio es de -90,15 dBm, el valor de SNR obtenido es para el arreglo de 6 elementos a 3 distancias diferentes respecto de la estación terrena se muestra en la Figura 68. El eje x de la gráfica representa los 360 grados del giro y el eje y los valores de relación señal a ruido en dB existentes para cada elemento del arreglo de 6 elementos, vistos a distancias de 2, 4 y 6 metros entre la estación terrena y el arreglo. Este valor de SNR se realiza para el enlace dron-estación terrena, que fue el más crítico en niveles RSSI y para las posiciones 1 a 3, ya que las posiciones restantes tienen el comportamiento similar en cuanto a niveles RSSI.

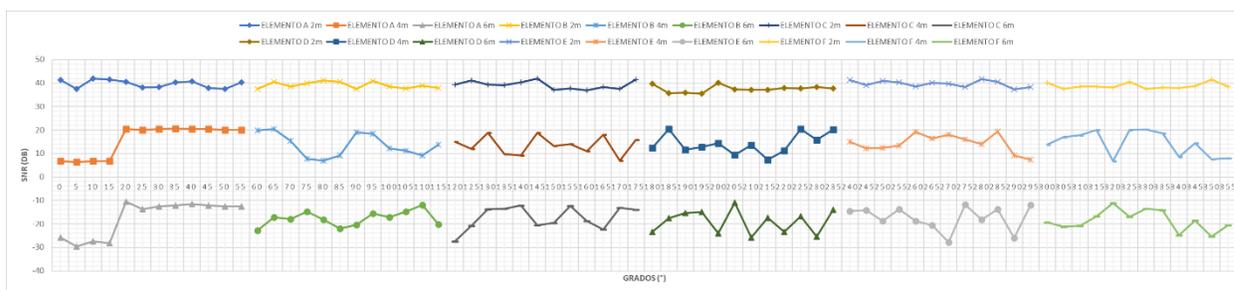


Figura 68. SNR del arreglo de 6 elementos.

A los 2 m, el valor de SNR obtenido está en un rango entre 35 y 40 dB. Para los 4 m, el valor de SNR se sitúa entre 8 y 20 dB. Para 6 m, los valores de SNR son negativos: fluctúan entre -30 y -11 dB.

Bajo los parámetros seleccionados en las pruebas de laboratorio se obtuvo que a una distancia de 6 metros, el valor de SNR negativo (entre -10 y -30 dB) muestra que el enlace no es posible, porque ya no hay una comunicación confiable. Los valores de SNR iguales o superiores a 20 dB sólo ocurren a distancias de 2 y 4 m entre la estación terrena y el dron. Solamente en estos 2 casos, la comunicación en el enlace es confiable.

Una relación señal a ruido (SNR) negativa indica que el nivel de ruido presente en el sistema es mayor que el nivel de la señal de interés, por lo que la señal puede ser difícil de distinguir del ruido lo que afecta negativamente la calidad de la comunicación o la capacidad de recuperar la información de manera confiable. Esto ocurre en situaciones donde la señal es muy débil o el ruido es muy intenso, lo que puede suceder en entornos con una alta interferencia electromagnética, ruido ambiental o

cuando la señal se ha atenuado significativamente debido a la distancia. Las pérdidas en el enlace pueden también ser debidas al fenómeno de polarización cruzada: no siempre el vector de campo eléctrico emitido o radiado por la antena trasmisora llega con la misma polarización: el elemento receptor en el dron puede inclinarse ligeramente por el movimiento relativo del vehículo, lo que no permite un acople de polarización del 100%.

En todas las aplicaciones, se busca tener una SNR positiva y superior a 10 veces, donde la potencia de la señal es mayor que la potencia del ruido, lo que facilita la detección y decodificación de la señal de interés. Para mejorar la SNR en las situaciones donde se encuentra negativa, se pueden utilizar técnicas como la reducción de ruido, mejora de la sensibilidad del receptor, aumento de la potencia de la señal transmitida o la selección de mejores canales de comunicación con menor interferencia. En este caso, tal y como se escaló la velocidad angular del giro del kit de antenas con la velocidad angular del dron, de la misma manera, la potencia de transmisión del dispositivo transmisor debe ser escalada para un nivel superior en el entorno real.

4. Disponibilidad del enlace

La disponibilidad del enlace se refiere al tiempo en el cual hay comunicación entre la estación terrena fija y el arreglo de antenas. Es esta disponibilidad la que garantiza la continuidad de la comunicación. Teniendo en cuenta que la velocidad del giro del kit de antenas es de 32 s, cada elemento del arreglo de 6 elementos tiene una disponibilidad de 5,33 s. Sin embargo, este valor es ideal, en la realidad se ve influenciado por las características del área efectiva de radiación de cada elemento, lo que otorga un porcentaje de disponibilidad para cada elemento, y tiempos diferentes de disponibilidad. El análisis desde la disponibilidad del enlace se realizó únicamente para el arreglo de 6 elementos, teniendo en cuenta los resultados de las pruebas realizadas con el arreglo de 4 elementos, que muestran que este arreglo no cumple con las características de cobertura en el giro necesarias.

- **Arreglo de 6 elementos.**

1. Enlace de la antena ubicada en la estación fija con el arreglo del dron:

La Tabla 2 muestra la disponibilidad del enlace para el arreglo de 6 elementos, en el sentido del enlace estación terrena – dron. El porcentaje de disponibilidad para este caso es de 95%, y tiempos diferentes de disponibilidad. La disponibilidad real del enlace en segundos se calcula teniendo en cuenta a (57):

$$M = P_{r0} - P_{th} \text{ (dB)} \quad (57)$$

Donde,

M es el margen del radioenlace, que tiene en cuenta la probabilidad de ocurrencia de situaciones de no disponibilidad por una SNR menor a 10 dB o por pérdida de señal.

P_{r0} , es la potencia esperada en condiciones normales de propagación que considera pérdidas de propagación en espacio libre.

P_{th} , es la potencia real recibida por el dispositivo.

Este cálculo toma como referencia las recomendaciones UIT-R F.1703, UIT-R P.530 y UIT-T G.826 que establecen los objetivos de disponibilidad para radioenlaces digitales.

Tabla 2. Disponibilidad del enlace para el arreglo de 6 elementos, enlace estación terrena-dron

Distancia (m)	Elemento A		Elemento B		Elemento C		Elemento D		Elemento E		Elemento F	
	esperada (s)	real (s)										
2	5,33	5,06	5,33	5,01	5,33	5,06	5,33	5,02	5,33	5,03	5,33	5,05
4	5,33	4,81	5,33	4,76	5,33	4,79	5,33	4,72	5,33	4,8	5,33	4,83
6	5,33	4,53	5,33	4,24	5,33	4,48	5,33	4,51	5,33	4,47	5,33	4,43

2. Enlace del arreglo ubicado en el dron con la antena de la estación fija:

La Tabla 3 muestra la disponibilidad del enlace para el arreglo de 6 elementos, en el sentido del enlace dron – estación terrena. El porcentaje de disponibilidad para este caso es de 93% y tiempos diferentes de disponibilidad.

Tabla 3. Disponibilidad del enlace para el arreglo de 6 elementos, enlace dron-estación terrena

Distancia (m)	Elemento A		Elemento B		Elemento C		Elemento D		Elemento E		Elemento F	
	esperada (s)	real (s)										
2	5,33	4,96	5,33	4,91	5,33	4,93	5,33	4,92	5,33	4,95	5,33	4,96
4	5,33	4,71	5,33	4,74	5,33	4,82	5,33	4,76	5,33	4,79	5,33	4,79

6	5,33	4,38	5,33	4,32	5,33	4,24	5,33	4,27	5,33	4,31	5,33	4,38
---	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Se logran altos porcentajes de disponibilidad en el enlace entre el dron y la estación terrena fija. La capacidad de controlar y dirigir el haz principal hacia la estación terrena permite una mayor robustez ante interferencias y ruido. Esto contribuye a mantener altos niveles de disponibilidad del enlace, asegurando una comunicación confiable y continua entre el dron y la estación terrena. Al establecer un objetivo de porcentaje de disponibilidad entre el 90% y el 95%, garantiza que el enlace de comunicaciones entre el dron y la estación terrena se mantenga operativo durante la mayor parte del tiempo.

5. Ancho de banda de información en el enlace.

Este análisis se refiere al ancho de banda atendido en la comunicación por enlace para el arreglo de 6 elementos, donde se asocia el ancho de banda con ancho de haz y su relación a -3 dB para poder tener una cobertura de 360°. En este caso, se tiene una disponibilidad de ancho de haz de potencia mitad de 82° que, con los 6 elementos, cada uno registrando una porción de 60°, entonces está entre los 82° del HPBW de cada elemento, teniendo en cuenta además los solapamientos existentes entre elementos adyacentes del arreglo.

En esta perspectiva, se puede correlacionar el ancho de banda con el ancho de haz que es un parámetro de radiación que se encuentra ligado al diagrama de radiación. La ganancia se relaciona tanto con la eficiencia energética como con la directividad de la antena y, por lo tanto, también está estrechamente relacionada con el ancho del haz. El ancho de haz y la ganancia tienen una relación inversa. La disminución del ancho de haz de la antena aumenta la ganancia. El ancho de banda es el rango de frecuencias en el que las características de la antena están dentro del valor aceptable alrededor de la frecuencia central, siendo este el rango de frecuencia en el que la antena puede transmitir o recibir la información en forma de ondas electromagnéticas y los parámetros de la antena cumplen unas determinadas características.

El ancho de banda está determinado por las frecuencias superior e inferior fuera de las cuales el nivel de energía en la antena decrece a más de 3dB. Los anchos de banda de una antena tipo parche suelen ser del 3%. El ancho de banda teórico de 35 MHz que fue calculado previamente se refiere a la

capacidad del arreglo para funcionar eficientemente dentro de un rango específico de frecuencias alrededor de la frecuencia central de operación, en este caso, 3,5 GHz. Este ancho de banda teórico se define por criterios de rendimiento, como una caída específica en la ganancia o en la respuesta de radiación fuera de ese rango.

Sin embargo, el ancho de haz de 82° también influye en los anchos de banda reales de funcionamiento. El ancho de haz se refiere al rango angular en el que se puede transmitir o recibir señales de manera efectiva. A medida que el ángulo de haz se amplía, el ancho de banda real se ve afectado, ya que el arreglo puede recibir o transmitir señales con eficiencia en un rango angular más amplio. El ancho de banda real de funcionamiento se ve influenciado por ambos parámetros donde se observa una interacción entre la capacidad del arreglo para operar dentro de un rango de frecuencias específico y su capacidad para transmitir o recibir señales en un rango angular determinado. Esta relación influye en los anchos de banda reales de funcionamiento del arreglo.

Otro factor que influye en el valor de ancho de banda real de funcionamiento encontrado es su relación con el obtenido a partir del parámetro de dispersión S11 de las antenas. El parámetro S11 es una medida de la reflexión de energía y puede utilizarse para evaluar el rendimiento en términos de ancho de banda. En el caso de este arreglo diseñado para funcionar en torno a la frecuencia de resonancia de 3,5 GHz, el ancho de banda real puede determinarse a partir del rango de frecuencias en el cual el parámetro S11 pasa por -10 dB alrededor de la frecuencia de resonancia. Cuando el parámetro S11 alcanza un valor de -10 dB alrededor de la frecuencia de resonancia, se considera que la potencia reflejada es aproximadamente el 10% de la potencia incidente. Por lo tanto, el rango de frecuencias comprendido entre estos puntos proporciona una indicación del ancho de banda real de funcionamiento del arreglo.

- **Arreglo de 6 elementos.**

1. Enlace de la antena ubicada en la estación fija con el arreglo del dron:

La Tabla 4 muestra el ancho de banda para el enlace con el arreglo de 6 elementos, en el sentido del enlace estación terrena - dron.

Tabla 4. Ancho de banda del enlace para el arreglo de 6 elementos, enlace estación terrena-dron

Distancia (m)	Elemento A		Elemento B		Elemento C		Elemento D		Elemento E		Elemento F	
	esperada (MHz)	real (MHz)										
2	35	25,7	35	25,7	35	25,3	35	25,8	35	25,2	35	25,6
4	35	23,2	35	23,9	35	23,8	35	23,2	35	23,5	35	23,7
6	35	22,5	35	22,1	35	21,9	35	22,3	35	22,5	35	22,9

2. Enlace del arreglo ubicado en el dron con la antena de la estación fija:

La Tabla 5 muestra el ancho de banda para el enlace con el arreglo de 6 elementos, en el sentido del enlace dron – estación terrena.

Tabla 5. Ancho de banda del enlace para el arreglo de 6 elementos, enlace dron-estación terrena

Distancia (m)	Elemento A		Elemento B		Elemento C		Elemento D		Elemento E		Elemento F	
	esperada (MHz)	real (MHz)										
2	35	25,5	35	25,4	35	25,5	35	25,8	35	25,2	35	25,6
4	35	23,1	35	23,7	35	23,8	35	23,1	35	23,1	35	23,3
6	35	22,3	35	22,5	35	21,7	35	22,4	35	22,5	35	22,6

Como a mayor ancho de haz hay un mayor ancho de banda, eso significa que el parche de la antena de la estación terrena fija tiene un menor ancho de banda real que el arreglo de parches. Se puede asociar el ancho de banda teórico que equivale al ancho de haz teórico, en este caso, para el arreglo de 6 elementos, si su ancho de banda teórico es 35 MHz y su ancho de haz teórico es de 82°, ahora bien, el enlace por elemento solo permite un ancho de haz de 60°, eso reduce el ancho de banda a su valor equivalente que se encuentra en un rango de 22 a 26 MHz. Se tiene en cuenta que un parche normalmente se recorta en su ancho de banda un 2 a 4% para lograr la resonancia en la frecuencia deseada.

6. Discusión de resultados.

Los resultados de la evaluación de los arreglos de antenas de haz conmutado de 4 y 6 elementos pueden ser analizados en diferentes ópticas: desde el funcionamiento de los arreglos de antenas construidos y desde la evaluación del enlace.

Inicialmente, se escogió un arreglo de haz conmutado debido a que ofrece una direccionalidad controlada, mayor ganancia, reducción de interferencias, flexibilidad de haz, menor tamaño y peso, y baja interferencia entre elementos, además de una baja complejidad en el procesamiento necesario para lograr la conmutación, características mencionadas por la literatura, seleccionando 4 y 6 elementos, para cubrir la mayor cantidad del espacio sin un número más elevado de elementos en el arreglo, lo que lleva a que exista un mejor acoplamiento mutuo de impedancias que hace converger la impedancia del arreglo hacia el valor de la baja impedancia característica de los conectores de tipo SMA y, de esta manera, exista una ganancia estable para el arreglo ya que, aunque se presente un menor ancho de haz, se tiene mayor directividad. De esta forma, se buscó que el ancho de haz del arreglo cubriera los 360° y que la directividad fuera mayor a 4 dBi. A más elementos la ganancia del arreglo y la impedancia de entrada aumentan, logrando así más directividad y por tanto cobertura, aunque también aumenta la complejidad del procesamiento para la conmutación entre elementos.

La proximidad entre los elementos de los arreglos genera cambio en la impedancia por acoplamiento mutuo de elementos y afecta el rendimiento individual de cada elemento y el patrón de radiación global del arreglo, ya que no se transfiere toda la energía del medio de transmisión a la antena o viceversa. Este fenómeno de acoplamiento mutuo en arreglos se observa también en antenas Yagi, donde hay ese acoplamiento entre el elemento director, los reflectores y el elemento activo, por lo que es un fenómeno común en los arreglos de antenas de cualquier tipo. Esto se evidencia en todos los arreglos de antenas.

Este número de elementos fue seleccionado además para aligerar el peso que debe ser cargado en el dron, de esta manera, se busca no limitar las características aerodinámicas del mismo. Esto explica la configuración del arreglo conformado en el espacio de una forma cilíndrica, ya que se busca que el movimiento del dron se vea alterado lo más mínimo posible por la ubicación en él de los componentes del sistema.

Los arreglos de antenas que utilizan elementos tipo parche o microstrip ofrecen numerosas ventajas, visibles en los resultados de la sección anterior. Una de las razones por las que estos elementos son ampliamente utilizados en arreglos de antenas se debe a su tamaño compacto y su facilidad de fabricación. Los elementos tipo parche son planos y se pueden integrar en sustratos dieléctricos, lo que facilita su miniaturización y su montaje en drones. Además, estos elementos son adecuados para operar en frecuencias de microondas, como es el caso de la banda de 3,5 GHz.

Sin embargo, existen algunas limitaciones asociadas con los elementos tipo parche en los arreglos de antenas, visibles también en los resultados de las pruebas. Una de ellas es su baja eficiencia, lo que implica que son eficientes solo en un rango específico de frecuencias, esto puede llegar a limitar su capacidad para operar en diferentes bandas de frecuencia o para soportar múltiples protocolos de comunicación multiportadora. En este sentido, respecto a la señal usada en transmisión y recepción en las pruebas de laboratorio, puede realizarse un paralelo entre el sistema de modulación de una sola portadora generado en el HackRF One, versus el que fue usado en el estudio de sistemas de comunicación en drones de Park (2009) mencionado en el marco de referencia, donde se obtienen mejoras al tener varias portadoras, al reducir la distorsión de la señal y las pérdidas multitrayectoria. Respecto a la eficiencia, se requiere más potencia para lograr cobertura por la eficiencia baja, pero se tiene la limitación que al ser placas metálicas sobre sustratos, las potencias altas podrían causar disrupciones sobre el dieléctrico.

Otra limitación es la radiación de ondas de superficie. Los elementos tipo parche o microstrip pueden generar ondas de superficie que se propagan a lo largo del sustrato dieléctrico, lo que puede resultar en pérdidas de radiación y una menor eficiencia en la transferencia de energía. Esto es especialmente visible en el enlace dron-estación terrena, donde las potencias transmitidas por el arreglo en el dron son menores a las transmitidas por la antena individual de la estación terrena, a pesar que la potencia nominal del dispositivo transmisor es la misma en ambos casos, dentro de un rango de 0 dBm a 5 dBm (3 mW).

En la literatura encontrada en el marco de referencia, se muestra que los drones hacen uso de antenas omnidireccionales que garantizan las comunicaciones entre drones. Las antenas omnidireccionales generalmente son de banda estrecha, por lo que son limitadas. En este estudio, en el que se usan arreglos de antenas de banda ancha y alta directividad, existe un fenómeno de dispersión o *scattering* al hacer la transición o conmutado entre los elementos del arreglo, un problema que ocurre por las

áreas efectivas de radiación del arreglo que causan que hayan momentos donde no hay enlace entre la estación terrena y el dron.

El escenario de pruebas controladas de laboratorio del enlace bidireccional entre el arreglo de antenas en el dron y la estación terrena fija se seleccionó para evaluar el rendimiento del sistema de comunicación en un contexto relevante para la aplicación específica que aborda la investigación. La comunicación bidireccional entre el dron y la estación terrena es esencial en la agricultura de precisión, donde se requiere la transmisión de datos y comandos en ambas direcciones. Este escenario de pruebas permite analizar cómo el arreglo de antenas tipo parche en el dron y la estación terrena interactúan entre sí para lograr una comunicación confiable y eficiente. También permite evaluar la capacidad del sistema para mantener una conexión estable y continua, considerando distancias y posiciones cambiantes.

Si se desea ampliar los escenarios de pruebas, se pueden considerar las siguientes opciones: inicialmente, tener pruebas específicas de laboratorio con una cámara anecoica de radiofrecuencia, que permite tener un espacio controlado de ondas electromagnéticas. También podría evaluarse el uso de escenarios rurales donde se evalúe el rendimiento del sistema en diferentes entornos, con mayores potencias de transmisión, donde las características de propagación de la señal pueden variar significativamente debido a la presencia de árboles u otros obstáculos. Pueden plantearse además escenarios de pruebas con interferencias para analizar cómo el arreglo de antenas se comporta en presencia de interferencias electromagnéticas, ya que esto puede afectar la calidad de la señal y la estabilidad del enlace y diseñar escenarios de prueba con alturas variables para probar el sistema en diferentes alturas de operación y comprender cómo la altura afecta la eficiencia del enlace y su adaptación a diferentes condiciones de vuelo del dron. Al considerar estos diversos escenarios de pruebas, se puede obtener una visión más completa del rendimiento del arreglo de antenas y su aplicabilidad en una variedad de entornos y condiciones de uso. Además, estos escenarios adicionales permiten abordar desafíos y trabajos futuros para optimizar aún más el diseño del sistema, maximizando su eficiencia y fiabilidad en diferentes situaciones de aplicación.

Para que exista un enlace real entre el dron y la estación terrena, se necesita que haya continuidad en la comunicación, lo que garantiza que no se pierda información o si existe la pérdida, que se pueda reenviar; si se hace la correspondencia de ancho de haz con ancho de banda se podría garantizar un ancho de banda amplio para cierto tipo de información como por ejemplo imágenes espectrales. La

arquitectura de una red de comunicaciones para drones está afectada por los parámetros de diseño seleccionados y las plataformas usadas para la comunicación. Del mismo modo, la optimización de la trayectoria del dron es un aspecto crítico de diseño, ya que afecta de gran manera el rendimiento y desempeño de las comunicaciones. La trayectoria del dron se debe determinar con base en las especificaciones de la calidad del servicio del usuario o la utilidad, el uso de energía del dron, el tamaño del dron y también la forma y localización de barreras en el entorno.

En las pruebas de laboratorio, los resultados evidencian que la calidad del enlace desde los niveles SNR para el arreglo de 6 elementos garantiza una comunicación continua a 2 y 4 metros de distancia en las pruebas de laboratorio. A los 6 metros de distancia y cuando los niveles RSSI son bajos, se debe tener en cuenta que en las transiciones entre elementos hay dispersión de campo, lo cual explica niveles por debajo de los -3 dB que no permiten la detección y conmutación correcta, causados además por la baja área efectiva, debido a las pérdidas por efectos de borde.

Desde la evaluación del enlace, los resultados pueden ser analizados inicialmente con la relación señal a ruido. En aplicaciones de comunicación en aplicaciones que hacen uso de drones, la relación señal a ruido (SNR) juega un papel fundamental en la calidad y confiabilidad de la comunicación. Debido a las limitaciones de potencia de transmisión en los drones, es crucial utilizar eficientemente la potencia disponible. Además, la dispersión rápida de la onda a frecuencias de microondas, como en la banda de 3,5 GHz, puede causar desvanecimiento de la señal, lo que afecta aún más la calidad de la comunicación.

Para mitigar estos efectos, se recomienda utilizar técnicas de codificación de canal que permitan una mayor robustez ante el ruido y las interferencias. Además, los esquemas de modulación seleccionados deben ser eficientes en potencia y capaces de resistir las condiciones adversas. Un ejemplo de esquema de modulación utilizado en este contexto es el CPM, modulación de fase continua, que ofrece una mayor eficiencia espectral y una mayor resistencia al ruido en comparación con otros esquemas de modulación, que en estas pruebas fue un tono modulado con una única portadora. La combinación de técnicas de codificación de canal y esquemas de modulación eficientes en potencia y resistentes al ruido permite mejorar la calidad de la comunicación inalámbrica en drones, superando las dificultades causadas por las potencias limitadas, la dispersión de la onda y el desvanecimiento de la señal.

La disponibilidad del enlace de comunicaciones entre un dron y una estación terrena fija debe tener en cuenta que no siempre se está transmitiendo constantemente información desde el dron. En tales casos, es posible utilizar estrategias para mejorar la confiabilidad de la comunicación, como transmitir dos o tres veces la misma información. Sin embargo, esta duplicación de la información implica un mayor costo en términos de procesamiento requerido en el receptor. Una alternativa para abordar este problema es utilizar técnicas de modulación multiportadoras. Las técnicas de modulación multiportadoras permiten dividir la información en varios subportadores que se transmiten simultáneamente. Cada subportador lleva una parte de la información original, lo que aumenta la eficiencia espectral del sistema. Además, en caso de que se produzcan errores en la recepción de algunos subportadores, es posible utilizar técnicas de corrección de errores para reconstruir la información original.

El uso de modulación multiportadoras en el enlace de comunicaciones entre un dron y una estación terrena fija ofrece ventajas significativas. Por un lado, mejora la utilización del ancho de banda disponible al transmitir múltiples subportadores. Por otro lado, proporciona una mayor resistencia a los errores de transmisión, lo que garantiza una mayor confiabilidad en la comunicación. Aunque puede aumentar la complejidad del receptor debido al procesamiento adicional requerido, los beneficios en términos de confiabilidad y eficiencia del sistema justifican su implementación en entornos donde la disponibilidad del enlace puede ser intermitente.

En el caso del ancho de banda del enlace entre un dron y una estación terrena fija en la banda de 3,5 GHz en el caso de la agricultura de precisión, donde las variables de monitoreo no requieren tasas de muestreo altas, no es un requisito cumplir siempre con un ancho de banda máximo. Sin embargo, es importante asegurar un ancho de banda mínimo adecuado para garantizar la transmisión confiable de los datos recopilados. En este contexto, un ancho de banda de 20 MHz podría considerarse suficiente para este tipo de aplicación. Esta cantidad de ancho de banda proporciona un espacio adecuado para la transmisión de los datos de monitoreo necesarios, sin incurrir en un exceso de consumo de recursos de comunicación. Además, un ancho de banda de 20 MHz en la banda de 3,5 GHz ofrece una buena capacidad de transmisión y es ampliamente compatible con los estándares de comunicación inalámbrica. Este ancho de banda mínimo permite una comunicación eficiente y confiable en aplicaciones de agricultura de precisión. Si bien no se requiere un ancho de banda máximo, asegurar un ancho de banda adecuado es fundamental para garantizar la calidad y la integridad de los datos transmitidos.

Para adaptar el sistema a una aplicación práctica en la agricultura de precisión, se pueden considerar las siguientes mejoras: una reducción del tamaño y peso del sistema teniendo en cuenta que para su implementación en drones agrícolas, es importante optimizar el tamaño y peso del arreglo de antenas, permitiendo una integración más eficiente en drones comerciales sin afectar significativamente su rendimiento y capacidad de carga útil; mejorar la eficiencia energética del sistema es crucial para maximizar el tiempo de vuelo del dron y aumentar su autonomía, ya que la reducción del consumo de energía en el proceso de comunicación mejora la capacidad del dron para realizar tareas más extensas en el campo sin interrupciones; optimizar la robustez y resistencia: debido a que la agricultura de precisión puede llevarse a cabo en diversos entornos, el sistema debe ser robusto y resistente para enfrentar condiciones climáticas adversas y ambientes hostiles para lo que se puede considerar el uso de materiales y técnicas de fabricación que mejoren la durabilidad del sistema; puede plantearse también la implementación de algoritmos de procesamiento de señales avanzados con el haz adaptativo con técnicas de inteligencia artificial que mejoren la capacidad del sistema para adaptarse a las variaciones del entorno y mitiguen los efectos de interferencias y ruido; finalmente, el sistema puede mejorarse mediante la realización de pruebas en campo y validación, ya que para asegurar que el sistema cumpla con los requisitos de la agricultura de precisión, es esencial realizar pruebas extensivas en campo y validar su rendimiento en condiciones reales de operación, con potencias de transmisión mayores, que proporcionen datos y resultados prácticos para respaldar la viabilidad y eficacia del sistema en aplicaciones agrícolas específicas.

Al considerar estas mejoras, el sistema de comunicación entre el arreglo de antenas en el dron y una estación terrena fija puede mejorarse y convertirse en una solución viable para la agricultura de precisión, permitiendo una monitorización y control más eficientes de los cultivos, optimizando los recursos y mejorando la productividad en el campo.

CONCLUSIONES

El arreglo de 4 elementos no cubre la totalidad de los 360°, ya que de los 90° que le corresponde a cada elemento del arreglo, sólo logra detectar señal en un rango comprendido entre 40 y 50 grados, por lo que de 50 a 40 grados asignados a cada elemento quedan sin detección de niveles RSSI y no garantiza una comunicación estable estación terrena fija-dron. Las zonas de transición de un elemento a otro, causales de la no iluminación (*scattering*, dispersión), se deben a la dispersión del campo por bordes, donde influye el concepto de apertura efectiva en recepción del arreglo.

Por su parte, el arreglo de 6 elementos sí permite una comunicación entre la estación terrena y el dron en la totalidad de los 360°, ya que cada elemento al que le corresponden 60° detecta los niveles RSSI provenientes de la estación terrena. Esto se debe a que el ancho de banda de potencia mitad de cada elemento cubre una mayor porción del espacio, permitiendo incluso que una parte de los niveles RSSI recibido por cada uno de los 6 elementos sea compartido por solapamiento con el siguiente elemento consecutivo en el arreglo. Como se pudo observar en los casos críticos en los que el arreglo estaba en las esquinas del esquema de pruebas de laboratorio, un ligero margen del 5 al 10% de los 360 grados puede no ser sentido por completo, lo que también es una razón por la cual no se siguió experimentando con arreglos de más de 6 elementos, a pesar que al tener más elementos da una mayor directividad. El arreglo de 6 elementos con su ancho de haz permite una comunicación gradual sincrónica cubriendo los 360 grados de giro, aunque no captura el 100% por la eficiencia baja de las antenas parche, debida al área efectiva de radiación de cada elemento del arreglo. Este arreglo permite tener un enlace eficiente: en arreglos de 8 o más elementos el ancho de haz sigue siendo 82 grados, habría un mayor solapamiento de los anchos de haz entre los elementos, no mejora ganancia ni alcance, y sí se aumenta la complejidad del procesamiento y el peso del arreglo.

Las eficiencias en áreas en una antena parche se refieren a la capacidad de la antena para radiar o recibir energía de manera eficiente en relación con el área física de la antena. La eficiencia total de una antena parche se compone de dos componentes principales: la eficiencia de radiación y la eficiencia de superficie. Una antena puede tener una eficiencia de radiación del orden del 80% al 90%. Una antena parche ideal tendría una eficiencia de superficie del 100%, lo que significa que toda la energía transmitida o recibida se utilizaría de manera efectiva. Sin embargo, en la práctica, las

pérdidas en los materiales dieléctricos y los elementos de acoplamiento pueden reducir la eficiencia de superficie para encontrarse entre el 80% al 95%.

La geometría del arreglo de antenas de haz conmutado de 6 elementos propuesto cumple con los criterios definidos en términos de acoplamiento mutuo y resolución espacial, y se ajusta a los métodos de estimación RSSI de la literatura. Esto fue validado mediante la estimación del RSSI en un entorno de pruebas controladas de laboratorio que recrearon un sistema de antenas inteligentes de haz conmutado ubicado en un dron. En cuanto a eficiencia, ganancia e impedancia, el arreglo tiene un comportamiento en las pruebas acorde con lo esperado de acuerdo a los cálculos teóricos y las simulaciones realizadas.

También se halló que, a medida que el dron se encuentra a una distancia mayor respecto a la estación terrena, los niveles RSSI detectados se vuelven pequeños, lo que puede llegar a impedir una conmutación efectiva entre los elementos, ya que con un menor ancho de haz se tiene mayor directividad. Los niveles RSSI muy bajos, pueden explicarse cuando se alcanzaban los 6 m. Para aplicaciones prácticas, teniendo en cuenta el escalamiento usado en las pruebas, se puede cubrir una zona de 20 m con el arreglo. Este escalamiento de dimensiones en las pruebas de laboratorio, donde se utilizó una altura de 1,2 m como altura del arreglo tuvo en cuenta una relación proporcional con los 20 m que es la altura típica de funcionamiento real encontrada en la literatura sobre drones utilizados en agricultura de precisión, lo que implica evaluar la propagación de la señal y los efectos de atenuación a medida que la altura del dron aumenta., lo que implica que el alcance de la comunicación entre el dron y la estación terrena se ve afectado por la altura. A través de este escalamiento, se pueden extrapolar los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio para estimar el rendimiento del arreglo de antenas a la altura de trabajo real del dron. Es importante tener en cuenta que este escalamiento de dimensiones es una aproximación y se basa en un modelo de prueba controlada de laboratorio. Con el fin de aumentar el alcance real del enlace estación terrena-dron pueden aumentarse los valores de potencia de las señales transmitidas siempre y cuando se tengan en cuenta las normas y valores máximos permitidos por los organismos reguladores correspondientes. Otros factores como el entorno de operación, las condiciones atmosféricas del cultivo y la presencia de obstáculos pueden afectar el alcance real del arreglo de antenas en la práctica.

La precisión de la medición RSSI puede verse afectada por diversos factores, como la interferencia y la atenuación de la señal debido a la propagación en el espacio libre o la presencia de obstáculos en

la zona de Fresnel por la frecuencia de trabajo en microondas. En general, la precisión de la medición RSSI para sistemas de microondas puede ser aceptable en condiciones favorables, pero es importante tener en cuenta las limitaciones y los factores que pueden afectar la calidad de la medición.

De la misma manera, en el enlace desde el dron a la estación terrena, el arreglo de 6 elementos permite una comunicación estable entre ambos puntos, pero nuevamente, la distancia entre el dron y la estación sigue siendo un factor clave para lograr la conmutación entre los elementos, ya que los niveles RSSI detectados son bajos a medida que la distancia se hace mayor. Se puede plantear el aumento de los niveles de potencia de los transmisores, con el fin de lograr mayores niveles RSSI que permitan realizar una correcta conmutación sin importar la distancia entre el dron y la estación terrena o incrementar el número de elementos del arreglo para tener mayor directividad y por ende alcance.

La altura de trabajo del dron es un aspecto clave: si el transceptor de la estación terrena presenta un tilt hacia abajo, es probable que, si el dron vuela a alturas muy elevadas, se realice el enlace con los lóbulos laterales de los elementos del arreglo, de manera especial si se encuentra directamente por encima de la antena de la estación terrena. Debido a la posible presencia de áreas sin enlace o nulas en los lóbulos laterales, el dron puede ver una señal más fuerte de una estación terrena que se encuentra más alejada, que la que está más cercana geográficamente, por lo que un dron puede operar por una estación terrena alejada en lugar de la más cercana. Lo recomendado a partir de los hallazgos obtenidos en este trabajo con la altura y velocidad escaladas a los valores de las pruebas controladas de laboratorio, muestra que no se debería superar una altura de trabajo de 20 metros. Esta altura proporciona una perspectiva adecuada para capturar imágenes aéreas y datos en terrenos agrícolas. A esta altura, los drones pueden obtener una cobertura eficiente del terreno para diversas aplicaciones, como el monitoreo del crecimiento de los cultivos, la detección de enfermedades o plagas, el análisis de la salud vegetal y la estimación de rendimiento.

Cuando aumenta el número de elementos en un arreglo de antenas, la impedancia mutua entre los elementos tiende a aumentar. La impedancia mutua se refiere a la interacción electromagnética entre las antenas adyacentes en el arreglo. A medida que se agregan más elementos, la proximidad entre ellos se reduce, lo que resulta en una mayor influencia de los campos electromagnéticos entre las antenas. Esta interacción puede generar acoplamientos y cambios en las características de impedancia de cada elemento, lo que altera su impedancia y demanda acoplamiento con la línea.

El aumento de la impedancia mutua en los arreglos puede tener varios efectos que afectan su rendimiento y su capacidad para irradiar o recibir señales de manera eficiente. Además, el acoplamiento entre los elementos puede alterar el patrón de radiación del arreglo, ya que la interferencia electromagnética puede causar cambios en la distribución de energía radiada. También puede afectar la ganancia y la directividad del arreglo, ya que la interferencia puede generar cambios en la concentración de energía en la dirección deseada. Para mitigar los efectos negativos de la impedancia mutua en un arreglo de antenas, se pueden tomar medidas como ajustar la geometría y el espaciado entre los elementos, utilizar técnicas de adaptación de impedancia, implementar técnicas de cancelación de acoplamientos o aplicar técnicas de formación de haces adaptativos. Estas técnicas ayudan a minimizar los efectos perjudiciales del aumento de la impedancia mutua y permiten mejorar el rendimiento general del arreglo de antenas a medida que se aumenta el número de elementos.

Se diseñaron, construyeron y evaluaron arreglos de antenas inteligentes de 4 y 6 elementos para la comunicación entre un dron y una estación terrena fija en la banda de 3,5 GHz, para lo que se apropió conocimiento acerca del estado del arte de las temáticas relacionadas. Posteriormente, se diseñaron e implementaron los arreglos de antenas y la metodología de sensórica RSSI más adecuados, se integraron el sistema de los arreglos con el diseño y ejecución del algoritmo para la conmutación del arreglo de antenas del dron. Finalmente, se validó el enlace de microondas bidireccional entre el dron y la antena terrena fija con el sistema realizado, mediante pruebas específicas. De manera transversal, se redactaron el artículo de publicación y el informe correspondiente a los resultados obtenidos.

Respecto a las hipótesis de trabajo, se corroboró la primera que indicaba que el uso de un sistema que contenga un arreglo de antenas inteligentes de haz conmutado puede ser adecuado, usando un algoritmo de conmutación. La segunda hipótesis que menciona la aplicación de la técnica de RSSI en los elementos del arreglo de antenas puede ser un buen mecanismo para estimar la ubicación de la estación terrena fija también fue corroborada. La tercera hipótesis de trabajo que expone que el uso de un arreglo con un número de 4 y 6 elementos puede ser más apropiado para el enlace en frecuencia de microondas se corroboró parcialmente: como se pudo observar en las pruebas el uso de un arreglo de 4 elementos no cumple los parámetros adecuados del enlace, el arreglo de 6 elementos sí los cumple, teniendo en cuenta sus limitaciones.

El enlace entre un arreglo de antenas de tipo parche presente en un dron y una estación terrena fija en la banda de 3,5 GHz ofrece características en términos de confiabilidad, disponibilidad, cobertura,

ancho de banda y alcance. En cuanto a la confiabilidad, este tipo de enlace se beneficia de la tecnología de antenas de parche, que ofrece una buena directividad y ganancia, lo que permite una comunicación estable y robusta entre el dron y la estación terrena, visible en los niveles de la relación señal a ruido del enlace. Además, la utilización de una banda de frecuencia de 3,5 GHz proporciona una excelente capacidad de penetración de obstáculos y un rendimiento confiable en entornos con presencia de obstrucciones.

En cuanto a la disponibilidad, el enlace entre la estación terrena y el dron en la banda de 3,5 GHz ofrece un buen equilibrio entre el ancho de banda disponible y la interferencia. Esto permite una mayor disponibilidad del enlace y una menor probabilidad de congestión espectral, lo que garantiza una conexión sólida y estable entre el dron y la estación terrena.

En cuanto a la cobertura y el alcance, la utilización de un arreglo de antenas de tipo parche en el dron permite una mayor directividad y focalización del haz de radiación. Esto se traduce en una mayor eficiencia en la transmisión y recepción de señales, lo que a su vez mejora la cobertura del enlace. En combinación con una banda de frecuencia de 3,5 GHz, que presenta buenas características de propagación, se puede lograr una comunicación confiable en distancias significativas entre el dron y la estación terrena, lo que permite un monitoreo y control eficaz de las operaciones del dron.

Finalmente, el enlace bidireccional entre un arreglo de antenas de tipo parche en un dron y una estación terrena fija en la banda de 3,5 GHz ofrece una comunicación confiable con un valor de SNR apropiado (>20 dB), una disponibilidad adecuada (95%) y una cobertura efectiva (80%). Estas características son esenciales para diversas aplicaciones, como la vigilancia agrícola, enmarcada en la agricultura de precisión, beneficiando la recolección de datos en tiempo real, permitiendo una operación eficiente y exitosa del dron en un entorno inalámbrico exigente.

TRABAJOS FUTUROS

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se puede tener en cuenta en una investigación futura que el valor de la directividad del arreglo de antenas puede variar según la precisión de las medidas y otros factores de diseño. Además, es posible que la directividad del arreglo pueda mejorarse aún más mediante técnicas de procesamiento de señales modernas como el haz adaptativo, el diseño de antenas más avanzados y un diferente número de técnicas, tales como MIMO en 3D.

Las dificultades y bajo rendimiento en el enlace entre un dron y una estación terrena pueden ser compensadas mediante el uso de antenas directivas con inclinación o con un *tilt* eléctrico específico, lo que atenúa las señales interferentes y así se aumentan los niveles de la relación señal a ruido del enlace, lo que hace la comunicación aún más estable.

Para aplicaciones en drones que requieran un alto ancho de banda, se pueden tener en cuenta arreglos de más de 6 elementos, ya que, entre más solapamiento de ancho de haz entre elementos, se garantizan mayores anchos de banda.

Las limitaciones observadas en las pruebas controladas de laboratorio llevan a pensar en la aplicación de tecnologías como LoRa o LoRaWAN para mantener las características aerodinámicas del dron, ya que el peso del arreglo y los sistemas de conmutación presentados en este estudio pueden llegar a perjudicar dichas características. De la misma manera, la aplicación de varias estaciones terrenas a lo largo del área de cultivo, en una configuración tipo malla o *mesh*, puede mejorar las posibilidades de conmutación en el arreglo de antenas. También, en lugar de utilizar un dron pueden ser usados los satélites de órbita baja (LEO).

Aunque los arreglos de antenas con elementos tipo parche o *microstrip* siguen siendo ampliamente utilizados debido a su tamaño compacto, su facilidad de fabricación y su capacidad para proporcionar directividad y ganancia en aplicaciones específicas, se continúan abordando estas limitaciones con técnicas de diseño avanzadas, como la implementación de técnicas de reducción del acoplamiento, la optimización del ancho de banda y la mejora de la eficiencia de radiación. La radiación que proviene de la línea de alimentación, es un problema que limita la polarización cruzada y el nivel de lóbulo lateral de los arreglos de antenas tipo parche. Tanto la polarización cruzada como los niveles de los

lóbulos laterales pueden ser mejorados aislando la red de alimentación de la cara radiante del arreglo, lo cual puede lograrse mediante el uso de sondas de alimentación o acoplamiento por apertura.

Al poner a prueba la usabilidad de los drones en ubicaciones geográficas diferentes, se observa que las características de una comunicación confiable, estable y segura son todavía un reto en la comunicación entre drones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Balanis, C. (2005). *Antenna Theory: Analysis and Design*. Third Edition. New Jersey: Wiley-Interscience.

Bayerlein, H., Theile, M., Caccamo, M. y Gesbert, D. (2021). Multi-UAV Path Planning for Wireless Data Harvesting With Deep Reinforcement Learning. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. Volume 2.

Cabrera Botero, J. y Páez Rueda, C. (2020). Diseño de una Antena de Patrón Conmutado para Banda ISM (2.4GHz). III Conferencia Internacional de Telecomunicaciones, Tecnologías de la Información y Comunicaciones.

Calderón, C., Pérez, H., Benavides, A. y Morales, L. (2014). Desarrollo de un arreglo circular de antenas utilizando herramientas de electromagnetismo computacional. México D.F.: Instituto Politécnico Nacional.

Castellanos, G., Deruyck, M., Martens, L. y Joseph, W. (2019). Performance Evaluation of Direct-Link Backhaul for UAV-Aided Emergency Networks. *Sensors*, 19, 3342.

Castellanos, G., Deruyck, M., Martens, L. y Joseph, W. (2020). System Assessment of WUSN Using NB-IoT UAV-Aided Networks in Potato Crops. Special section on innovation and application of Internet of Things and emerging technologies in smart sensing. Volume 8. *IEEE Access*.

Castellanos, G., Vallero, G., Deruyck, M., Martens, L., Meo, M. y Joseph, W. (2021). Evaluation of flying caching servers in UAV-BS based realistic environment. *Vehicular Communications* 21. Elsevier Inc.

Castrillón, S. (2016). Implementación y caracterización de antena microstrip en geometría de anillo. Medellín: Instituto Tecnológico Metropolitano.

Chen, Z., Pappas, N., Bjornson, E. y Larsson, E. (2021). Optimizing Information Freshness in a Multiple Access Channel With Heterogeneous Devices. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. Volume 2.

Cruz, W. (2017). Métodos AOA, PDOA e Híbridos para la localización de un transmisor no colaborativo mediante lanzamiento de rayos sobre un motor de juegos. Cali: Universidad Icesi.

DJI. (2017). SPARK. Manual del usuario. V1.2. Recuperado de: https://dl.djicdn.com/downloads/Spark/Spark_User_Manual_V1.2_ES.pdf

Giró Uribaz, F., Selva Castañeda, A. y Almaguer Lora, Y. (2015). Diseño y simulación de un arreglo de antenas microcinta lineal y uniforme a la frecuencia de 2.4 GHz con variaciones de máximos de radiación. Universidad de Oriente, Cuba. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/304336214>

Guerra, S., Lomaña, Y., Guzmán, O. y Pérez, Y. (2013). Optimización de la Estimación de DOA en Sistemas de Antenas Inteligentes usando criterios de Redes Neuronales. La Habana: Universidad de las Ciencias Informáticas.

Guitál, C. (2007), Antenas inteligentes y su desempeño en redes Wireless. Valdivia: Universidad Austral de Chile.

Hernández Sampieri, R. (2014). Metodología de la investigación. Sexta Edición. México D.F.: McGraw-Hill.

Ibrahim, M. Deif, S. y Sharawi, M. (2012). A 14-element Printed Planar Antenna Array Embedded Within a UAV Structure. Loughborough: Antennas & Propagation Conference - IEEE.

Jackson, D. (2006). ECE 6345: Microstrip Antennas - Fall 2006. Class Project. ECE Department. Houston: Universidad de Houston.

Kraus, J. (2003). Antennas: for all applications. Third Edition. Singapore: McGraw-Hill.

Kulas, L. (2018). RSS-Based DoA Estimation Using ESPAR Antennas and Interpolated Radiation Patterns. IEEE antennas and wireless propagation letters. Vol. 17, 1.

Lahmeri, M., Kishk, M. y Alouini, M. (2021). Artificial Intelligence for UAV-Enabled Wireless Networks: A Survey. IEEE Open Journal of the Communications Society. Volume 2.

Li, Q., Wen, M., Wang, S., Alexandropoulos, G. y Wu, Y. (2021). Space Shift Keying With Reconfigurable Intelligent Surfaces: Phase Configuration Designs and Performance Analysis. IEEE Open Journal of the Communications Society. Volume 2.

Mathworks. (2019). Comunicaciones inalámbricas. Recuperado de <https://la.mathworks.com/solutions/wireless-communications.html>

Olan Nuñez, K. (2019). Diseño, Modelado y Caracterización de Arreglo de Antenas Microstrip para Aplicaciones del Internet de las Cosas. Puebla: Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE).

Orbaiceta, A. (2017). Diseño y caracterización de un array de antenas en tecnología plana en la banda de 8 GHz con polarización circular. Pamplona: Universidad Pública de Navarra.

Park, P., Choi, S., Lee, D. y Lee, B. (2009). Performance of UAV (Unmanned Aerial Vehicle) Communication System Adapting WiBro with Array Antenna. Department of Inform. And Telecommunications Engineering. Seúl: Korea Aerospace University.

Sánchez, T. (2016). Radiolocalización de emisiones en actividades de sensado de espectro, mediante la implementación de un algoritmo híbrido AoA/TDoA en una plataforma SDR. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.

Shamsoshoara, A., Afghah, F., Blasch, E., Ashdown, J. y Bennis, M. (2021). UAV-Assisted Communication in Remote Disaster Areas Using Imitation Learning. IEEE Open Journal of the Communications Society. Volume 2.

Sharma, A., Vanjani, P., Paliwal, N., Wijerathna, C., Jayakody, D., Wang, H., y Muthuchidambaranathan, P. (2020). Communication and networking technologies for UAVs: A survey. Journal of Network and Computer Applications. Ed. 168. Elsevier. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102739>

Shen, T. y Ochiai, H. (2021). A UAV-Enabled Wireless Powered Sensor Network Based on NOMA and Cooperative Relaying With Altitude Optimization. IEEE Open Journal of the Communications Society. Volume 2.

Stefanovic, C., Panic, S., Bhatia, V. y Kumar, N. (2021). On Second-Order Statistics of the Composite Channel Models for UAV-to-Ground Communications With UAV Selection. IEEE Open Journal of the Communications Society. Volume 2.

TAC Temas Avanzados en Comunicaciones. (2008). Introducción a los sistemas de múltiples antenas. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.

Tse, D., y Viswanath, P. (2005). *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press.

UIT-R (2015). Report ITU-R SM.2355-0 Spectrum monitoring evolution. SM Series, Spectrum management. ITU – R Radiocommunication Sector of ITU.

Vinogradov, E., Sallouha, H., De Bast, S., Azari, M. y Pollin, S. (2018). Tutorial on UAVs: A Blue Sky View on Wireless Communication. *Journal of Mobile Multimedia*. Volume 14, Issue 4. River Publishers.

Widmer, J. (2017). Meeting the Challenges of the Protocol Level Issues for 5G Networks. IEEE ComSoc Webinar. Madrid: IMDEA Networks.

National Instruments. (2019). Modelo USRP 2954. Recuperado de <http://www.ni.com/es-co/support/model.usrp-2954.html>

Zeng, Y., Zhang, R. y Joon, T. (2016). Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges. *IEEE Communications Magazine*.

GLOSARIO

AoA: Ángulo de llegada

HPBW: Ancho de banda de potencia mitad

PIRE: Potencia Isotrópica Radiada Equivalente.

PoA: Potencia de llegada.

ROE: Relación de onda estacionaria.

RSSI: *Received signal strength indicator*, Indicador de fuerza de señal recibida.

SDR: Radio Definido por Software.

TDoA: Diferencia de tiempo de llegada.

UAV: *Unmanned Aerial Vehicle*, Vehículo Aéreo No Tripulado.

USRP: Periférico universal de radio definido por software.

VSWR: *Voltage Standing Wave Ratio*, equivalente al ROE.

ANEXOS

Anexo 1. Herramientas de diseño y equipos usados.

A.1.1. Software de diseño y simulación MATLAB.

MATLAB (abreviatura de *MATrix LABoratory*, "laboratorio de matrices") es un sistema de cómputo numérico de la compañía Mathworks que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M).

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones: Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (*toolboxes*); y las de Simulink con los paquetes de bloques (*blocksets*). El entorno de trabajo de esta herramienta se observa en la Figura 69.

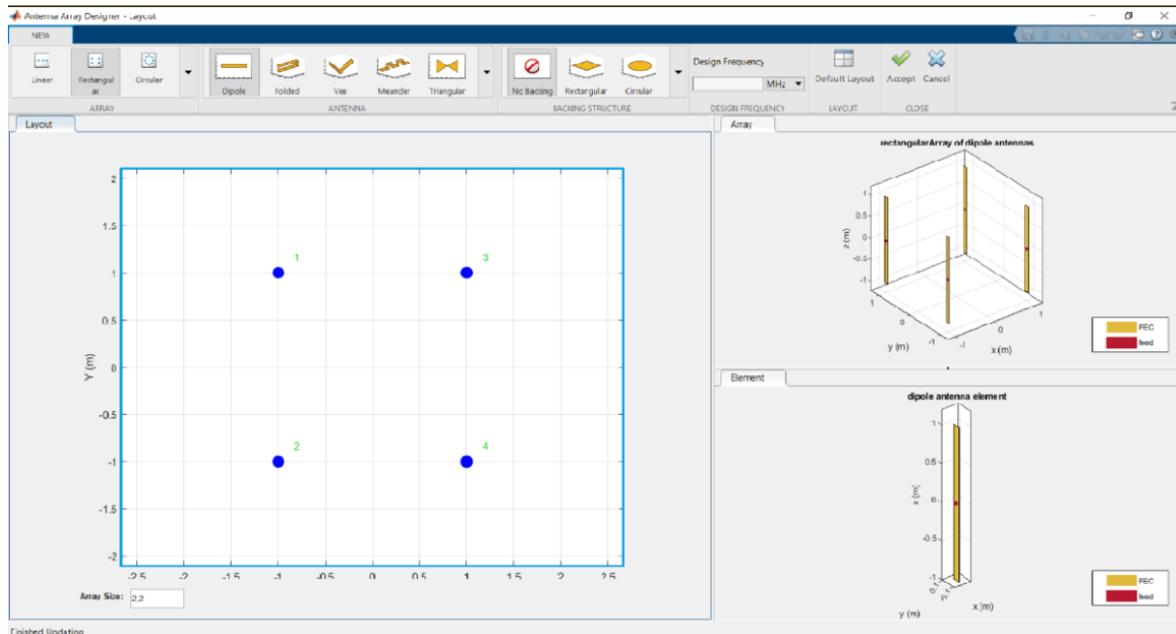


Figura 69. Entorno de trabajo de MATLAB de Mathworks.

Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL. El uso de MATLAB para comunicaciones inalámbricas reduce el tiempo de desarrollo, elimina los problemas de diseño de forma anticipada y agiliza los procesos de prueba y verificación.

Se pueden demostrar los conceptos de diseño de algoritmos y sistemas con la simulación y las señales por el aire; generar formas de onda personalizables para verificar la conformidad con los últimos estándares de 5G, LTE y WLAN; crear modelos con elementos de tipo digital, RF y antena para explorar y optimizar el comportamiento del sistema; generar automáticamente código HDL o C para el prototipado y la implementación sin tener que generarlo de forma manual; crear modelos de referencia reutilizables para la verificación iterativa de diseños, prototipos e implementaciones de comunicaciones inalámbrica y automatizar el análisis de datos de pruebas de campo a gran escala, visualizando los resultados de la simulación. (Mathworks, 2019).

A.1.2. Software de diseño y simulación SystemVue.

SystemVue (recientemente conocido como *PathWave System Design*) es un software especializado, producto de la compañía estadounidense Keysight Technologies, que permite simular y generar señales de diferentes servicios de comunicaciones móviles y tecnologías, con estándares establecidos, mediante la modificación y creación de estructuras de bloques denominadas *Workspaces*. También permite la simulación de arreglos de antenas para ver su comportamiento en términos de ganancias y directividades, permitiendo la variación del ángulo y la fase del arreglo.

En el software SystemVue pueden simularse todas las tecnologías de radio actuales, tanto fijas como móviles, algunas de las tecnologías que incluye son: difusión de TV en el estándar europeo DVB, comunicaciones fijas, comunicaciones móviles, celular/UMTS, radar, satélite, LTE-A, 5G NR, entre otras, como se observa en la Figura 70. Posteriormente pueden descargarse estas señales en generadores vectoriales de señal, para su análisis en tiempo real.

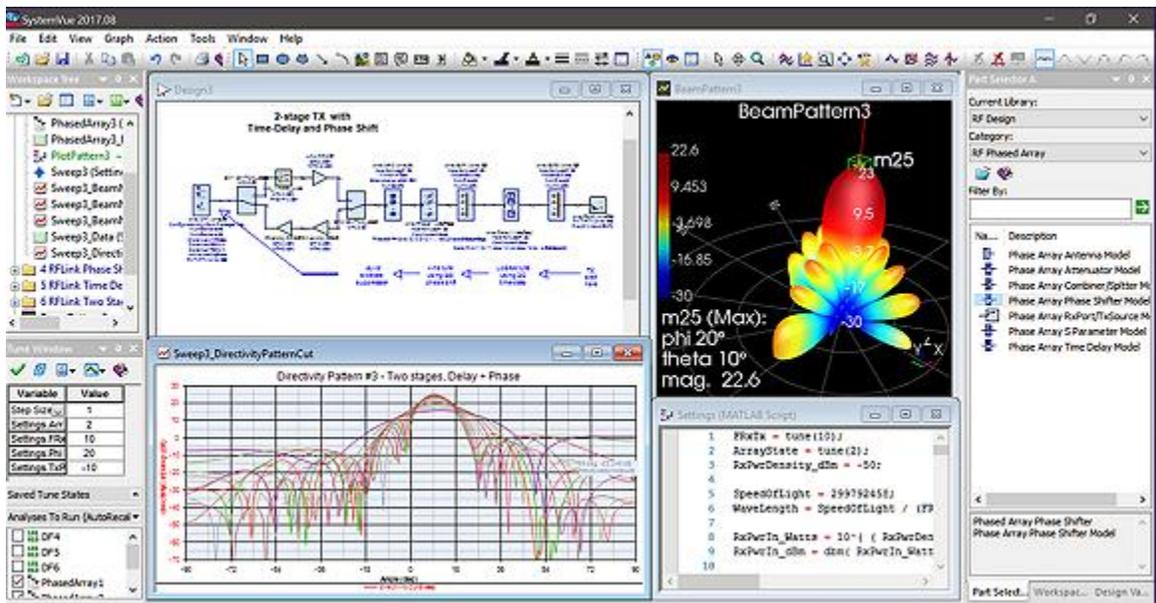


Figura 70. Entorno de trabajo de SystemVue de Keysight Technologies.

A.1.3. Software de diseño y simulación CST Studio.

CST Studio Suite, de la compañía Dassault Systèmes, es un software de análisis de EM 3D de alto rendimiento para diseñar, analizar y optimizar componentes y sistemas electromagnéticos (EM). Los solvers de campo electromagnético para aplicaciones de todo el espectro de EM se encuentran dentro de una única interfaz de usuario en CST Studio Suite. Los *solvers* se pueden acoplar para realizar simulaciones híbridas, lo que proporciona a los ingenieros la flexibilidad necesaria para analizar sistemas completos compuestos de varios componentes de forma eficiente y directa. El diseño conjunto con otros productos de SIMULIA permite integrar la simulación de EM en el flujo de diseño e impulsa el proceso de desarrollo desde las primeras etapas.

Entre los objetos más comunes del análisis se incluyen el rendimiento y la eficiencia de antenas y filtros, la compatibilidad electromagnética y las interferencias (EMC/EMI), la exposición del cuerpo humano a campos de EM, los efectos electromecánicos en motores y generadores, y los efectos térmicos en dispositivos de alta potencia. El entorno de trabajo de esta herramienta puede verse en la Figura 71.

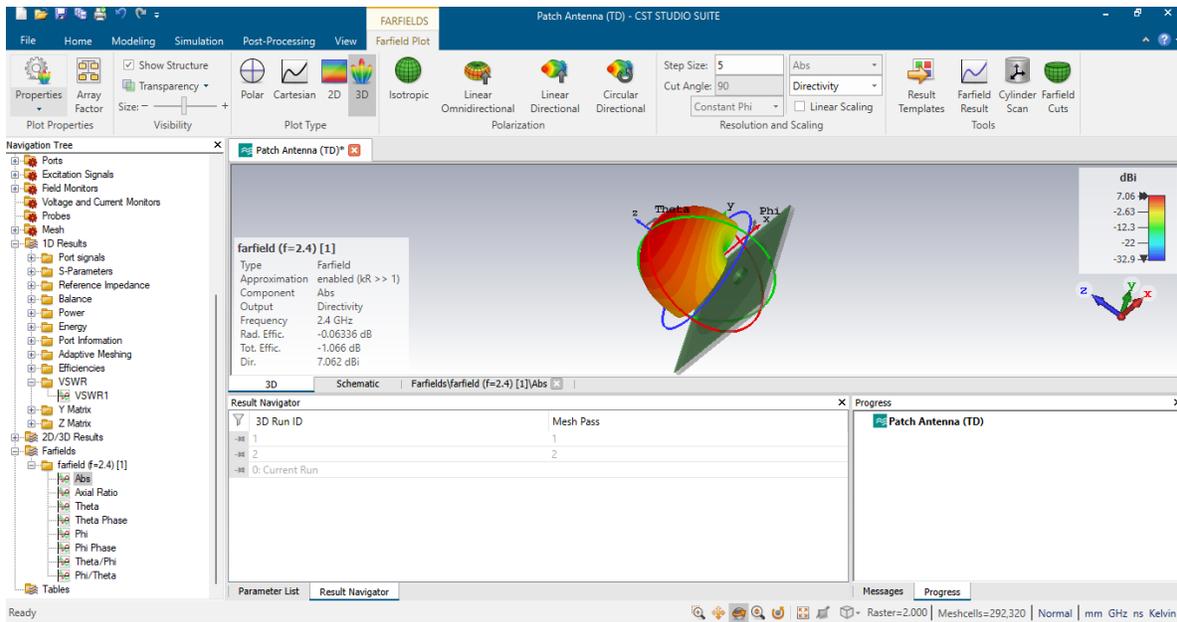


Figura 71. Entorno de trabajo de CST Studio Suite de Dassault Systèmes.

A.1.4. Software LabVIEW Communications.

LabVIEW Communications es un software de National Instruments diseñado para el desarrollo de sistemas de comunicaciones inalámbricas y redes definidas por software (SDN, por sus siglas en inglés). Este software ofrece un conjunto de herramientas para el diseño, prototipado y prueba de sistemas de comunicaciones avanzados, permitiendo a los ingenieros desarrollar sistemas más rápido y de manera más eficiente. Su interfaz de trabajo se observa en la Figura 72.

Con LabVIEW Communications, los usuarios pueden implementar algoritmos de procesamiento de señales personalizados, crear sistemas de red y control de acceso, y realizar pruebas de sistemas en un entorno simulado. Además, el software permite la integración con hardware de NI, como radios definidos por software, y con hardware de terceros para una mayor flexibilidad en el diseño del sistema. LabVIEW Communications es una herramienta poderosa para la creación de sistemas de comunicaciones avanzados y redes definidas por software. Algunas características de LabVIEW Communications son: Permite el diseño de sistemas de comunicaciones inalámbricas avanzados; tiene herramientas de prototipado rápido para el desarrollo de algoritmos de procesamiento de señales personalizados, simulación de sistemas de comunicaciones y pruebas de sistemas en entornos

simulados. Integración con hardware de NI y hardware de terceros para una mayor flexibilidad en el diseño del sistema; desarrollo de sistemas de red y control de acceso, soporte para protocolos de comunicaciones comunes como LTE, Wi-Fi, Bluetooth; análisis avanzado de señales para la optimización del rendimiento del sistema, entorno de programación gráfica intuitiva con bloques de programación que representan funciones y algoritmos de procesamiento de señales. Posibilidad de integración con otras herramientas de NI, como LabVIEW FPGA y LabVIEW NXG.

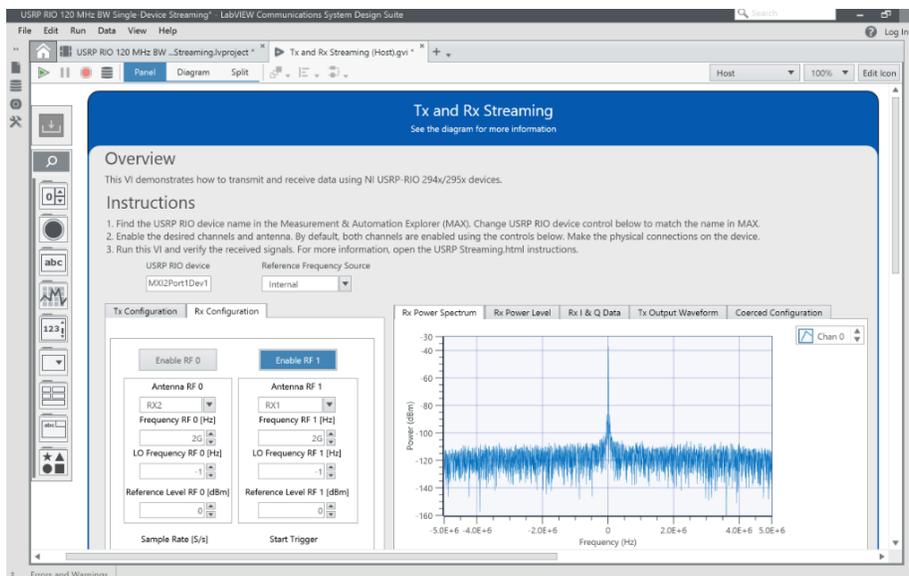


Figura 72. Interfaz de trabajo de LabVIEW Communications.

A.1.5. Software GNU Radio.

GNU Radio es un software de código abierto diseñado para el procesamiento de señales de radiofrecuencia y la creación de sistemas de comunicaciones basados en software. Este software permite a los usuarios implementar una amplia gama de algoritmos de procesamiento de señales y crear sistemas de comunicaciones personalizados mediante la combinación de bloques de procesamiento de señales gráficos. Los usuarios pueden crear y ejecutar flujos de trabajo personalizados para el procesamiento de señales, modulación y demodulación, filtrado, y decodificación. La interfaz de trabajo de GNU Radio se muestra en la Figura 73.

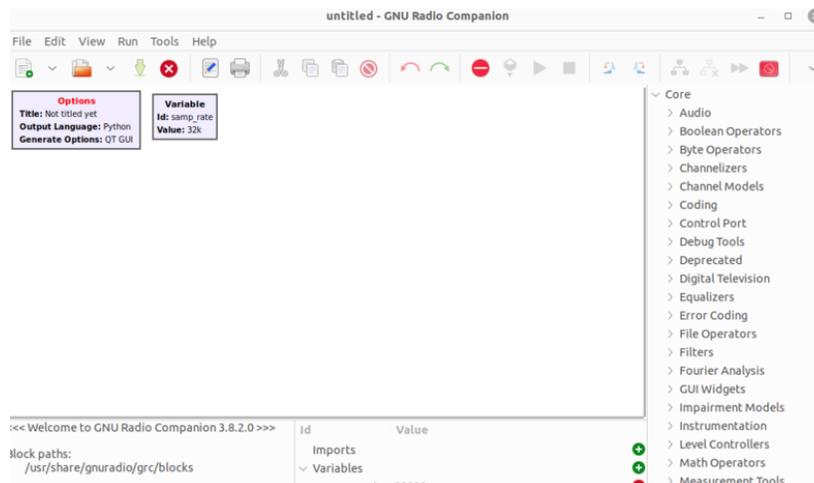


Figura 73. Interfaz de trabajo de GNU Radio.

Además, GNU Radio admite la integración con hardware de radio definido por software (SDR, por sus siglas en inglés) y otros dispositivos de hardware, es una herramienta valiosa para los desarrolladores de sistemas de comunicaciones basados en software, ya que permite la implementación rápida y eficiente de algoritmos de procesamiento de señales y la creación de sistemas personalizados basados en bloques de procesamiento de señales. GNU Radio proporciona una biblioteca de bloques de procesamiento de señales predefinidos que pueden ser combinados de forma gráfica para construir sistemas de comunicaciones personalizados. GNU Radio es un software de código abierto, lo que significa que los usuarios pueden modificar y mejorar el código fuente para adaptarlo a sus necesidades específicas.

En cuanto al uso en sistemas de comunicaciones inalámbricas como drones, GNU Radio puede ser utilizado para la implementación de sistemas de comunicaciones personalizados y avanzados que permitan la transmisión de datos y control del dron a través de señales de radiofrecuencia. Además, GNU Radio puede ser utilizado para el desarrollo de sistemas de comunicaciones seguras y resistentes a interferencias, lo que es especialmente importante en entornos de vuelo de drones donde pueden existir múltiples fuentes de interferencias.

A.1.6. Hardware para pruebas y mediciones.

A.1.6.1. NI USRP-2954R.

Es un dispositivo reconfigurable de Radio Definido por Software (*SDR*) USRP, con frecuencia de operación de 10 MHz a 6 GHz y un oscilador de cristal (*OCXO*) manejado por GPS. Ofrece una solución integrada de hardware y software para rápida generación de prototipos de sistemas de comunicación inalámbrica de alto rendimiento. Se conecta a través de un puerto PCIe-x4 al computador donde está integrado el software LabVIEW. En la Figura 74 se muestra al USRP-2954R

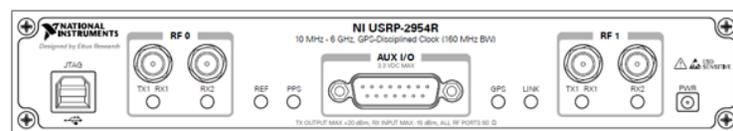


Figura 74. USRP-2954R de National Instruments.

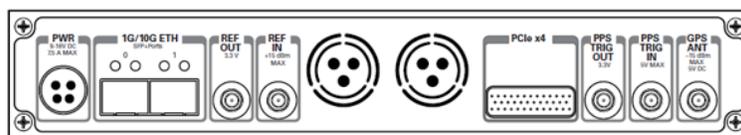
Basado en la arquitectura de E/S reconfigurables (RIO) de LabVIEW, USRP RIO ofrece una solución integrada de hardware y software para que los investigadores puedan generar prototipos más rápido y reducir el tiempo a resultados. Pueden generarse prototipos de una variedad de aplicaciones avanzadas de investigación que incluyen, múltiple entrada y múltiple salida (MIMO); sincronización de redes heterogéneas; retransmitir LTE; muestreo de RF; detección de espectro; radio cognitiva; formación de haz y detección de dirección.

El USRP-2954 está equipado con un reloj de referencia OCXO de 10 MHz manejado por GPS. El manejo por GPS ofrece mejores capacidades de sincronización y precisión de frecuencia. (National Instruments, 2019).

Los paneles frontales y posterior del dispositivo USRP se muestran en la Figura 75, con cada uno de los terminales y conexiones soportadas.



a)



b)

Figura 75. Panel frontal a) y Panel posterior b) del USRP-2954R (National Instruments, 2019).

Los parámetros de transmisión del USRP se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de transmisión del USRP-2954R. (National Instruments, 2019).

Parámetro	Valor
Número de canales	2
Rango de frecuencia	10 MHz a 6 GHz
Pasos de frecuencia	<1 KHz
Potencia de salida máxima (P_{out})	50 mW a 100 mW (17 dBm a 20 dBm)
Rango de ganancia	0 dB a 31,5 dB
Paso de ganancia	0,5 dB
Ancho de banda instantáneo máximo de tiempo real	160 MHz
Tasa de muestreo de I/Q máxima	200 MS/s
Convertidor digital a análogo (DAC)	
Resolución	16 bit

Parámetro	Valor
Rango dinámico libre de señales espurias (sFDR)	80 dB

A.1.6.2. HackRF One

HackRF One de Great Scott Gadgets es un periférico de radio definido por software capaz de transmitir o recibir señales de radio de 1 MHz a 6 GHz. Diseñado para permitir la prueba y el desarrollo de tecnologías de radio modernas y de próxima generación, HackRF One (visto en la Figura 76) es una plataforma de hardware de código abierto que puede usarse como un periférico USB o programarse para una operación independiente.

Entre sus características se encuentran una frecuencia de funcionamiento de 1 MHz a 6 GHz con transceptor semidúplex permitiendo hasta 20 millones de muestras por segundo. Muestras en cuadratura de 8 bits (I de 8 bits y Q de 8 bits), compatible con GNU Radio, SDR#. Ganancia de RX y TX configurable por software y filtro de banda base, alimentación del puerto de antena controlada por software (50 mA a 3,3 V) Conector de antena SMA hembra con entrada y salida de reloj SMA hembra para sincronización, alimentado por USB y usado con hardware de código abierto.



Figura 76. HackRF One de Great Scott Gadgets.

A.1.6.3. Placa Arduino Mega 2560

El Arduino Mega 2560 es una placa de microcontrolador basada en el ATmega2560. Tiene 54 pines digitales de entrada/salida, 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos seriales de hardware), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP y un botón de reinicio. La placa puede verse en la Figura 77.

La placa tiene suficiente memoria y potencia de procesamiento para manejar proyectos complejos y se utiliza a menudo en robótica, automatización y otras aplicaciones avanzadas. El Mega 2560 es compatible con la mayoría de los *shields* de Arduino y se puede programar utilizando el IDE de Arduino. Es una placa versátil y potente que es adecuada para una amplia gama de proyectos. Las entradas analógicas en la placa Arduino Mega 2560 permiten al usuario leer señales analógicas provenientes de sensores y otros dispositivos electrónicos.

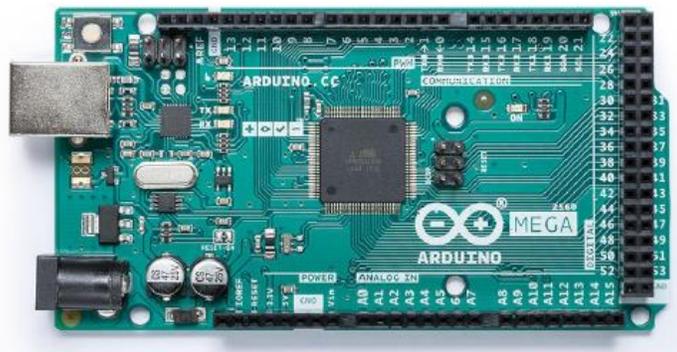


Figura 77. Placa Arduino Mega 2560.

La placa tiene un total de 16 entradas analógicas, que se numeran A0 a A15. Cada entrada analógica tiene una resolución de 10 bits, lo que significa que puede detectar hasta 1024 niveles diferentes de voltaje. La entrada analógica convierte el voltaje en una señal digital que puede ser leída por el microcontrolador. Para leer el valor de una entrada analógica, se utiliza la función "*analogRead()*" en el IDE de Arduino. La entrada analógica es útil en una amplia variedad de aplicaciones, como la medición de temperatura, la detección de luz, la monitorización de la humedad y la conexión de diversos sensores para aplicaciones de robótica o impresiones 3D.

Las entradas digitales en la placa Arduino Mega 2560 permiten al usuario leer señales digitales provenientes de sensores y otros dispositivos electrónicos. La placa tiene un total de 54 pines digitales

de entrada/salida, de los cuales 15 se pueden configurar como entradas digitales. Las entradas digitales se utilizan para leer señales binarias que pueden estar en uno de dos estados: alto (1) o bajo (0). Para leer el valor de una entrada digital, se utiliza la función "*digitalRead()*" en el IDE de Arduino. La entrada digital es útil en una amplia variedad de aplicaciones, como la detección de pulsadores, la lectura de señales de onda cuadrada y la monitorización de la presencia o ausencia de objetos. Además, las entradas digitales también se pueden utilizar para controlar dispositivos de salida, como luces, motores y relés. La disposición de los pines en la placa se observa en la Figura 78.

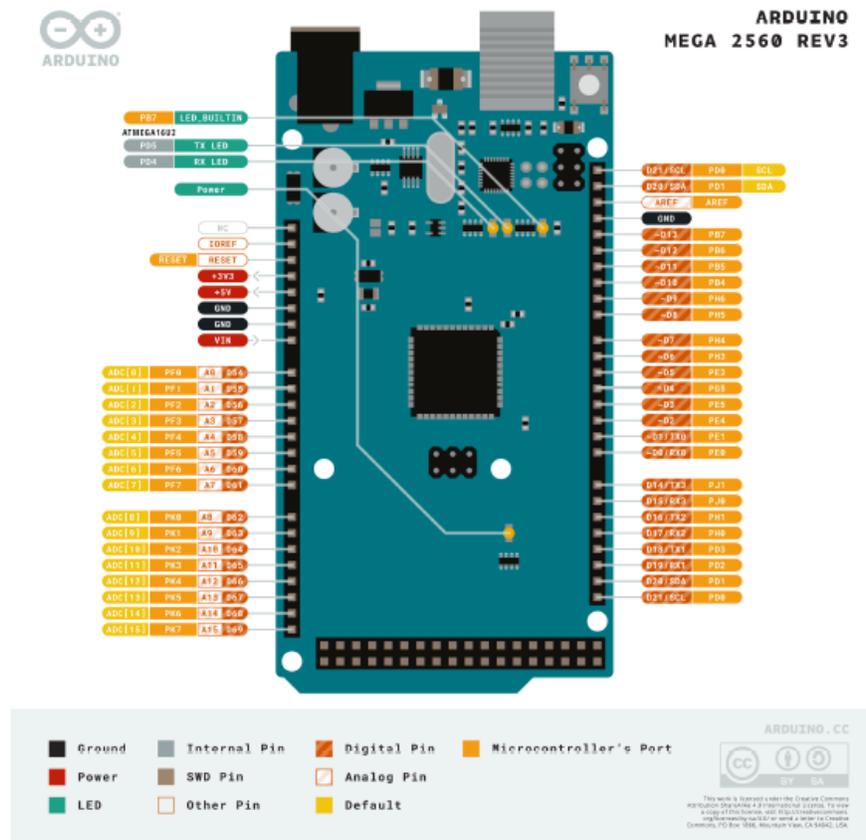


Figura 78. Disposición de pines en la placa Arduino Mega 2560. (Arduino, 2022).

A.1.6.4. Analizador de redes Keysight FieldFox N9918A.

Es un analizador vectorial de espectro portátil de redes y de microondas con una frecuencia de operación máxima de hasta 26,5 GHz. Además de las características propias de analizador de

espectro, para la caracterización de antenas genera una señal tonal en todo el rango de frecuencias del dispositivo y permite visualizar el comportamiento de la antena ante parámetros como S11, VSWR y la impedancia de la antena en la carta de Smith. En la Figura 79 se observa este dispositivo.



Figura 79. FieldFox N9918A de Keysight.

A.1.6.5. Analizador de señales Keysight N9000B.

El analizador de señales N9000B de Keysight es un instrumento de medición avanzado que se utiliza para analizar y caracterizar señales de radiofrecuencia (RF) y microondas. Este analizador de espectro ofrece un rango de frecuencia de 3 KHz a 7,5 GHz, y una resolución de frecuencia de hasta 0,001 Hz. Además, cuenta con un ancho de banda de análisis de hasta 40 MHz, lo que permite analizar señales complejas de manera eficiente.

El N9000B también tiene una alta sensibilidad, lo que significa que puede medir señales débiles con precisión y detectar señales más débiles que otros analizadores de espectro. Entre sus características adicionales se encuentran la posibilidad de realizar mediciones de fase, la opción de realizar mediciones de potencia de ruido, la capacidad de analizar señales de banda estrecha y una amplia variedad de herramientas de análisis de modulación. El N9000B es una herramienta poderosa y versátil para la caracterización de señales de RF y microondas en una variedad de aplicaciones, incluyendo el diseño y la verificación de sistemas inalámbricos, la fabricación de dispositivos de

comunicación inalámbricos y la investigación y desarrollo de tecnología de comunicación inalámbrica.

Permite observar los principales parámetros espectrales, tales como frecuencia central, span, nivel de referencia y resolución de ancho de banda (RBW), los cuales se ajustan utilizando los menús dedicados del panel frontal y el teclado. Incluye tres mediciones automáticas de RF: Potencia de Canal, Relación de Potencia de Canal de Canal Adyacente y Ancho de Banda Ocupado. El dispositivo puede verse en la Figura 80.



Figura 80. Analizador N9000B de Keysight.

Anexo 2. Protocolo de simulaciones.

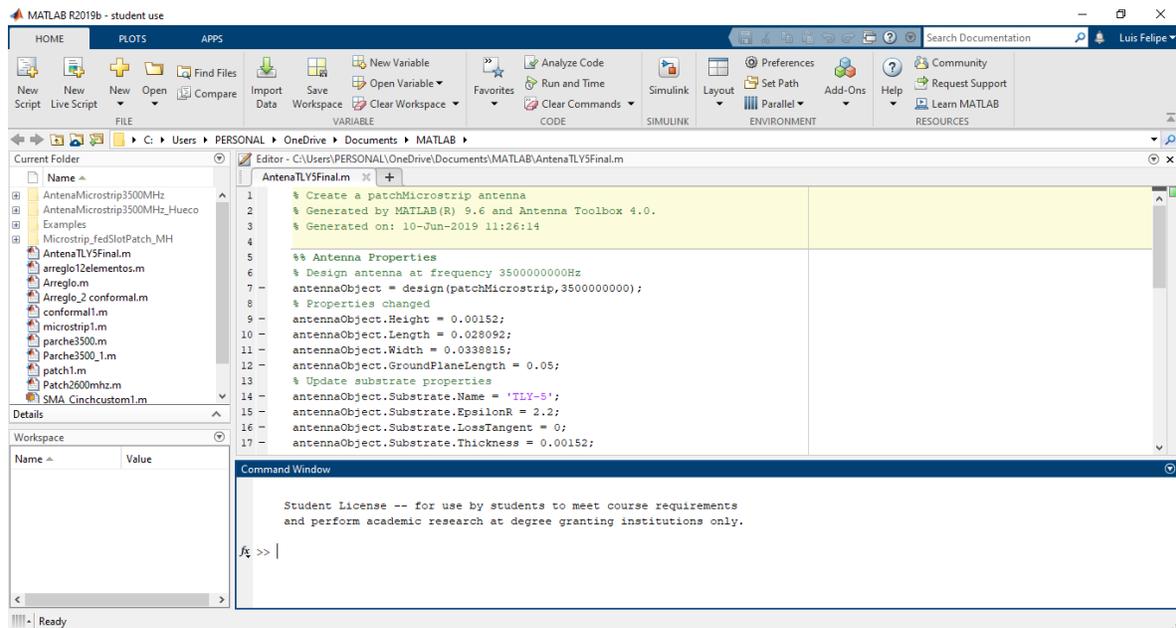
En este protocolo se presenta el diseño y desarrollo de las simulaciones realizadas en la plataforma MATLAB para los arreglos de antenas en la frecuencia de 3,5 GHz.

Requerimientos.

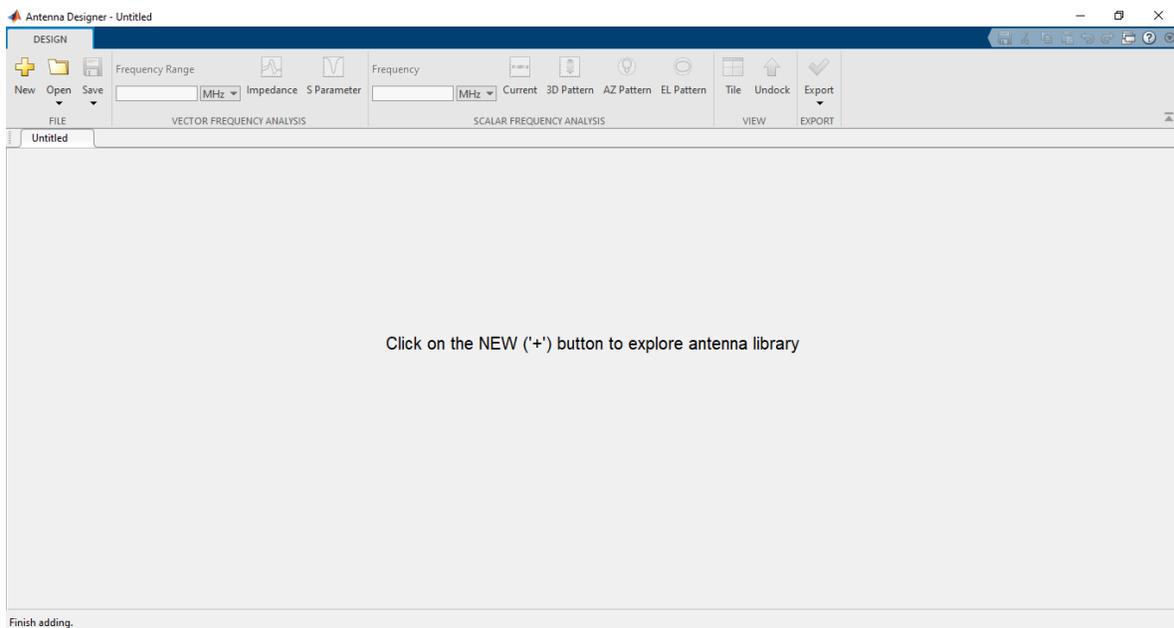
Inicialmente, se requiere la adquisición de una licencia para la plataforma MATLAB R2019b y una licencia adicional para utilizar el *Antenna Toolbox* integrado que contiene el *Antenna Designer*. Es importante tener en cuenta que para la ejecución de las simulaciones a la frecuencia de 3,5 GHz se recomienda que la instalación se haga en un computador con 16 GB de memoria RAM, de otra manera, las simulaciones no pueden realizarse.

Procedimiento.

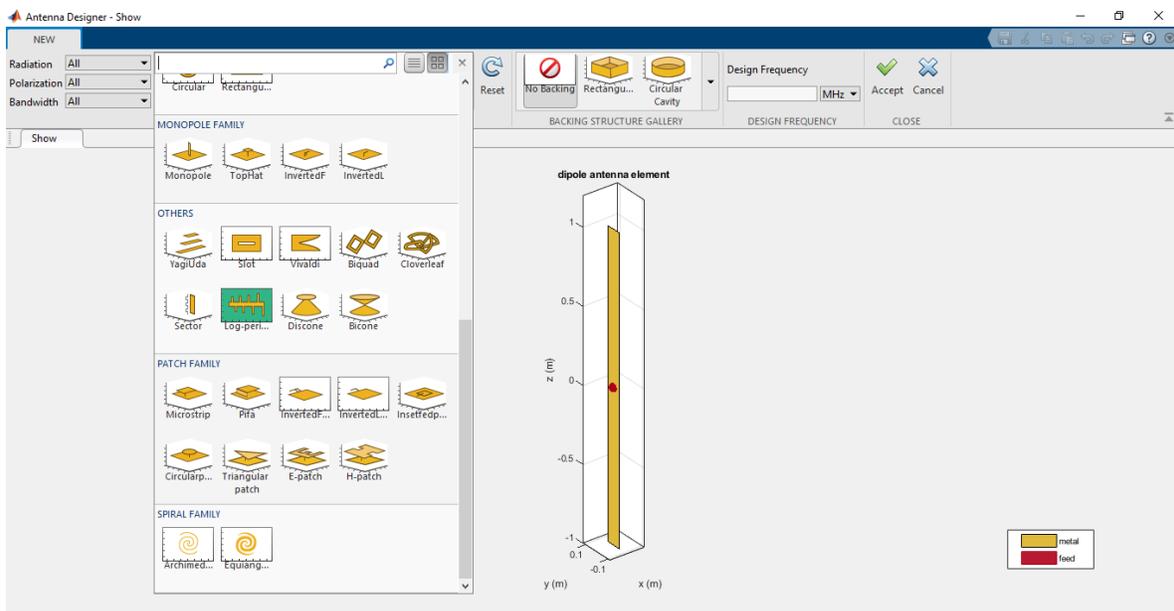
1. En la interfaz principal de MATLAB se ingresa en la pestaña *Apps* de la barra de herramientas superior, donde se encuentra ubicado el ícono de *Antenna Designer*.



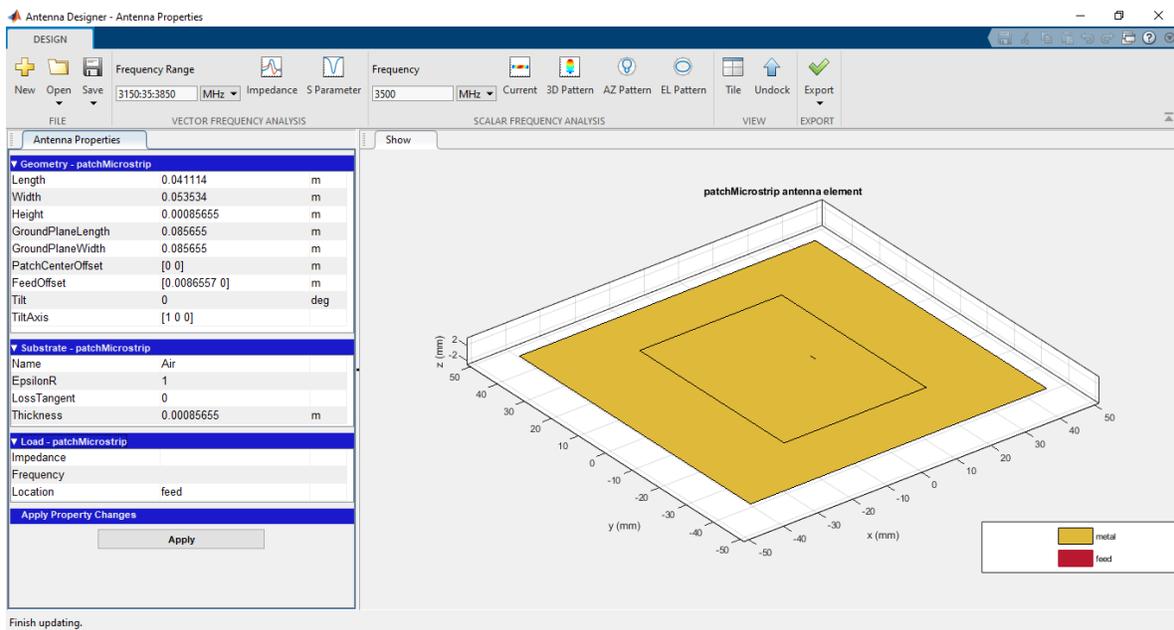
2. En el *Antenna Designer* se selecciona el botón *New*.



- Posteriormente, se selecciona el tipo de antena que se va a simular, en este caso, una antena *microstrip*.



- Se ingresan los valores correspondientes al largo y ancho del parche, la frecuencia de operación de la antena y la permitividad del sustrato que se va a usar.



5. Se inicia la simulación con el botón *Run*.
6. La plataforma realiza la caracterización de la antena, con parámetros como directividad, S11 y gráfica los patrones de radiación de la antena.

Anexo 3. Protocolo de pruebas.

En este protocolo se presenta los pasos seguidos en las pruebas físicas realizadas para la evaluación de los arreglos de antenas construidos.

Requerimientos.

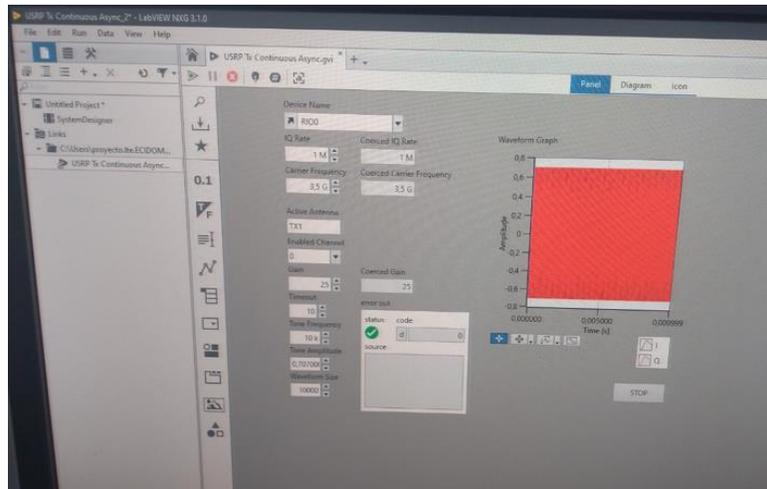
Inicialmente, se requiere la adquisición de una licencia para la plataforma *LabVIEW Communications*, que maneja al dispositivo de radio definido por software USRP-2954R y va a generar las señales desde la estación terrena a la frecuencia deseada. También es necesario contar con un analizador de señales que trabaje a esa frecuencia, para corroborar la generación adecuada de las señales, en este caso es el analizador de señales N9000B de Keysight. Las pruebas se desarrollan en el laboratorio de telecomunicaciones de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Procedimiento.

1. En la interfaz de la plataforma *LabVIEW Communications*, se verifica la conexión con el USRP-2954R, así como la conexión de la antena de la estación terrena fija con el USRP por medio de un cable SMA



2. Se ejecuta el espacio de trabajo correspondiente para la generación de una señal de 3,5 GHz en *LabVIEW Communications*.



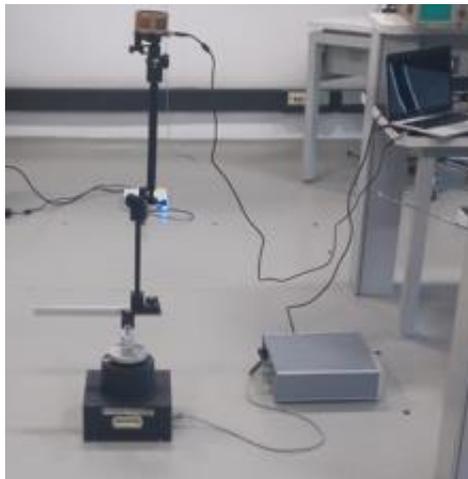
3. Se verifica la generación de esa señal por medio del analizador de espectro N9000B.



4. Se realiza la conexión de la placa Arduino con el arreglo de antenas, de manera que se puedan medir los niveles RSSI de cada elemento, gracias al algoritmo implementado en el Arduino IDE. El arreglo de antenas va girando con el dispositivo del entrenador de antenas, para conocer los niveles RSSI.

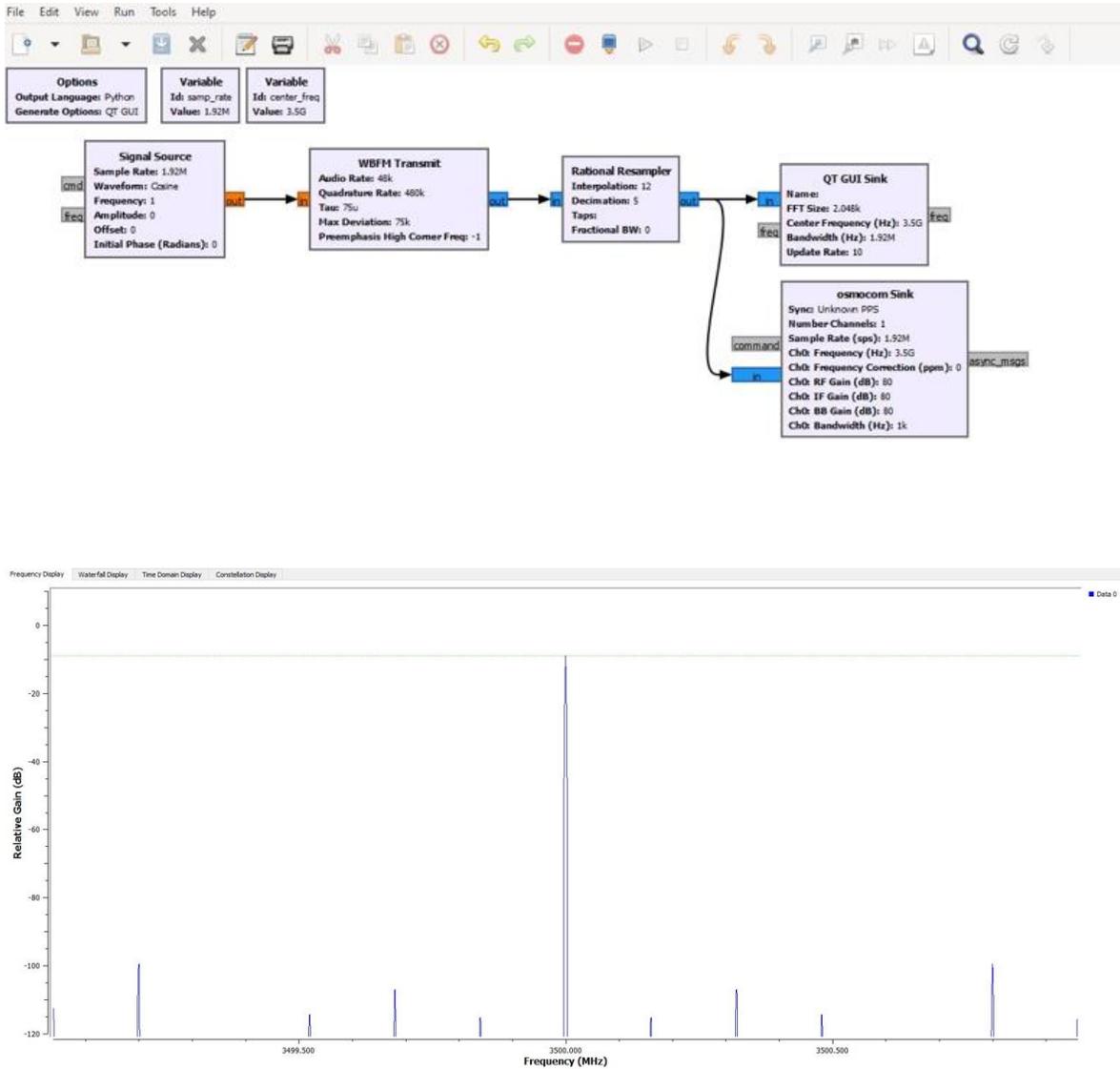


5. Se mueve el entrenador de antenas que tiene el arreglo de antenas en su parte superior a lo largo de las diferentes posiciones seleccionadas para variaciones de distancias.

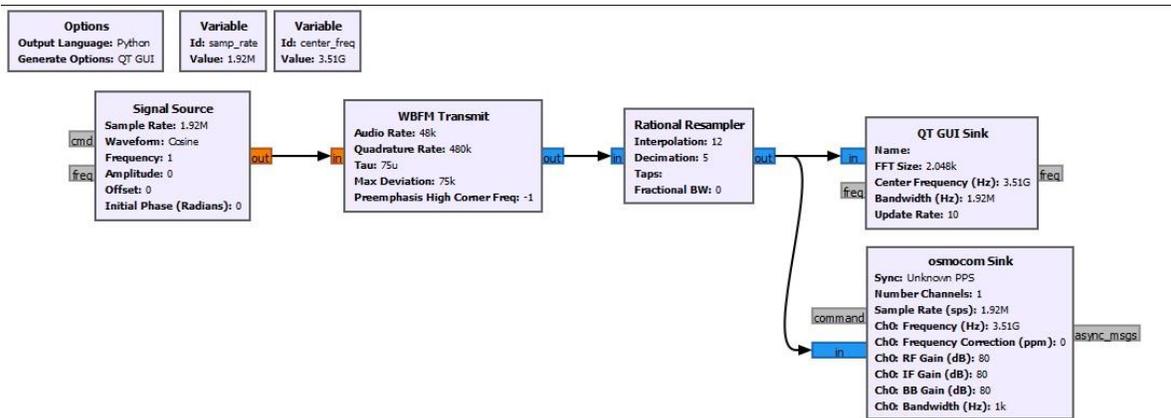


6. Para la conmutación, se procedió a realizar un cambio por temas de rendimiento del computador que controla el software LabVIEW, ahora la señal de la estación terrena es

generada por GNU Radio a través del dispositivo HackRF One, con las mismas características de la señal anterior, a una frecuencia de 3,5 GHz.

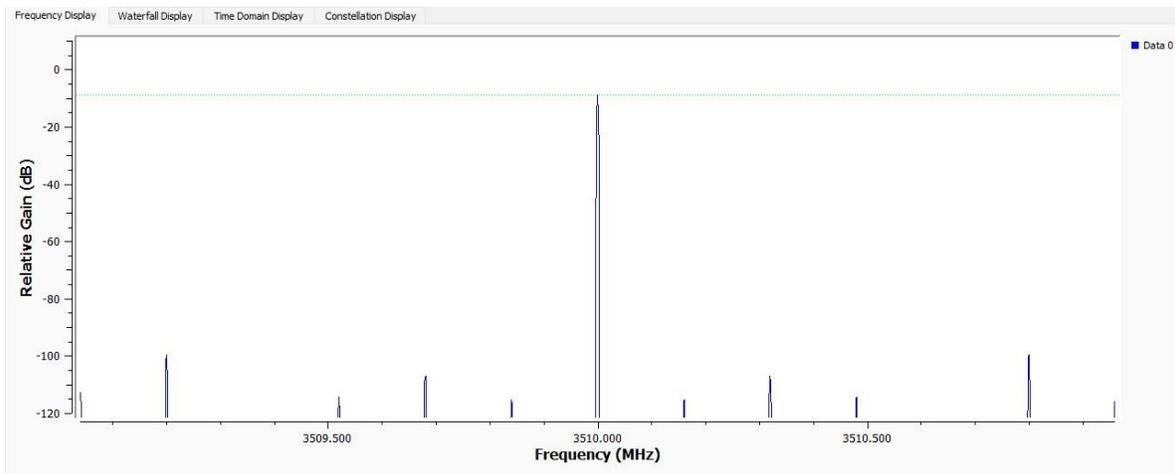


7. La señal que se transmite por el dron también es generada por un dispositivo HackRF One controlado por GNU Radio, pero a una frecuencia de 3,51 GHz.



```
gr-osmosdr 0.2.0.0 (0.2.0) gnuradio v3.8.2.0-57-gd71cd177
built-in sink types: uhd hackrf bladerf soapy redpitaya file
[INFO] [UHD] Win32; Microsoft Visual C++ version 14.2;
Boost_107500; UHD_4.0.0.HEAD-0-g90ce6062
Using HackRF One with firmware 2017.02.1
len(interp_taps) = 668
gr::pagesize: no info; setting pagesize = 4096
```

Id	Value
Imports	
Variables	
center_freq	3.51e9
samp_rate	1.92e6



Anexo 4. Constancia del inicio del proceso para la publicación del artículo de investigación.

Como parte de los requerimientos de la Institución para los trabajos de grado, el presente proyecto debe generar un artículo de publicación en una revista indexada, a continuación, se presenta una copia del correo recibido por IEEE LATINCOM (IEEE Latin-American Conference on Communications), a la cual se postuló el artículo.

[LATINCOM 2023] #1570924433 has been uploaded  

 EDAS Conference Manager en nombre de Jalel Ben Othman (jalel.benothman@centralesupelec.fr) <jalel.ben...  
Para: LUIS FELIPE RIAÑO GALEANO; HERNAN PAZ PENAGOS Mar 13/06/2023 12:34 PM

No suele recibir correos electrónicos de jalel.benothman=centralesupelec.fr@edas.info. [Por qué esto es importante](#)

Dear Mr. Luis Felipe Riaño Galeano:

Thank you for uploading your review manuscript for paper 1570924433 (*Design, construction and evaluation of a smart antenna array for communication between an UAV and a fixed ground station in the 3,5 GHz band*) to **15th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)**. The paper is of type application/pdf and has a length of 610524 bytes.

You can modify your paper at [1570924433](#) and see all your submissions at <https://edas.info/index.php?c=31121> using the EDAS identifier luis.riano@mail.escuelaing.edu.co

Regards,
Jalel Ben Othman and Fernando Merchan
Meditcom 2023 TPC Chairs